

COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE GRAN PERALTO DE HORMIGÓN ARMADO CON ABERTURAS BAJO CARGAS ESTÁTICAS BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS WITH OPENINGS UNDER STATIC LOADS

Autores: Marien Luis Santos
Gilberto Rodríguez Plasencia
Jorge Douglas Bonilla Rocha

Institución: Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba

Correo electrónico: marien@unica.cu

RESUMEN

En este trabajo se realiza un estudio del comportamiento de las vigas de gran peralte de hormigón armado con aberturas bajo carga estática y con predominio de esfuerzos cortantes. Para la modelación numérica se utiliza el ABAQUS, para el estudio del comportamiento de estas estructuras se realiza la simulación numérica del ensayo de vigas de gran peralte con aberturas en combinación con ensayos experimentales existentes. La modelación de los materiales se considera en régimen no lineal, para el hormigón se utiliza el Modelo de Daño Plástico y para el acero se emplea un modelo trilineal con criterio de rotura de Von Mises. A partir de la adecuada calibración y validación de las consideraciones del modelo, se procede al estudio de la influencia de factores físico-mecánicos y del refuerzo en este tipo de estructuras, donde principalmente se estudia la influencia de la posición, forma y dimensiones de las aberturas, la cuantía de los diferentes tipos de refuerzos y su relación directa en el comportamiento estructural que puede determinar los posibles tipos de falla a cortante en estas vigas.

Palabras Clave: Comportamiento estructural, Simulación numérica, Vigas con aberturas
Vigas de gran peralto.

ABSTRACT

In this paper studies the behavior of deep beams of reinforced concrete with openings under static load and predominantly shear. For numerical modelling are used the ABAQUS, to study the behavior of these structures was realized simulation the test of deep beams with openings in combination with existing international experimental. The modelling of materials is considered in nonlinear regime, for concrete specifically the Concrete Damage Plasticity model is used. From the proper calibration and validation of the considerations of the model, we proceed to the study of the influence of physical-mechanical and reinforcing factors in this

type of structures, where mainly are studied the influence of the position, shape and dimensions openings, also are studied the amount of different types of reinforcements and their direct relationship to the structural behavior that can determine the possible types of shear failure in these beams.

Key Words: Beams with web openings, Deep beams, Numerical simulation, Structural behavior.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la utilización de vigas de gran peralte de hormigón armado en las construcciones modernas ha aumentado sustancialmente, principalmente en la construcción de puentes y edificaciones donde se desea cubrir grandes luces y soportar grandes cargas. En la actualidad los investigadores están inmersos en los estudios de este tipo de estructuras con aberturas, variante constructiva que posibilita el paso de tuberías y conductos para proporcionar a las edificaciones servicios básicos como el aire acondicionado, la calefacción, el abastecimiento de agua, teléfono, electricidad, internet y otras redes en general.

A pesar realizarse varios estudios experimentales sobre vigas de gran peralte de hormigón armado con aberturas, destacándose los trabajos de (Kong y Sharp, 1977) y en las últimas décadas (Ashour y Rishi, 2000), (Tan, Tong, y Tang, 2003), (Yang, Eun, y Chung, 2006), (Yang y Ashour, 2007), (Lee, Li, y Lee, 2008), (Yoo, Doh, Guan, y Fragomeni, 2011), (Campione y Minafò, 2012), entre otros, todavía existen imprecisiones en la estimación de la capacidad resistente última de este tipo de estructuras, dado principalmente por la inadecuada comprensión de los fenómenos tenso-deformacionales y la amplia variedad de factores que influyen en el comportamiento estructural de estas vigas.

Es necesario comentar que en la actualidad se ha incrementado el estudio de este tipo de estructuras mediante simulación numérica se puede resaltar (Ali, Alwash, y Mosheer, 2009), (Amin, Agarwal, y Aziz, 2013), (Mohamed, Shoukry, y Saeed, 2014), (Nair y Kavitha, 2015), entre otros, estos a su vez permiten evaluar la influencia de factores en la capacidad resistente. La modelación numérica ha venido ganando espacio en este sentido y sin duda alguna esta herramienta no es solo una alternativa económica, por la posibilidad de describir el comportamiento de la estructura a un costo mínimo de recursos, sino también por la ventaja de poder apreciar fenómenos tan complejos como la propagación de las tensiones en el interior de la estructura y la evolución del daño estructural, fenómenos imposibles de observar en los ensayos reales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelación del ensayo de vigas de gran peralte con aberturas

En este trabajo con el objetivo de validar la utilización del MEF implementado en el software (ABAQUS, 2014) para la modelación de las vigas de gran peralte con aberturas, se ha considerado la no linealidad del acero y del hormigón, adoptando para el caso del acero un modelo bilineal con criterio de rotura de Von Mises y para el hormigón un modelo de daño plástico (Concrete Damaged Plasticity), modelos utilizados eficientemente en trabajos recientes (Hernández, Bonilla, y Rodríguez, 2014), (Bonilla et al., 2015), (Sánchez, Rodríguez, y Bonilla, 2016), (Rodríguez, Bonilla, y Hernández, 2017), donde se obtienen muy buenos resultados en correspondencia con experimentos a escala real de diferentes tipos de estructuras, evidenciando la factibilidad de utilizar estos modelos constitutivos para los materiales.

En este trabajo se simulan los ensayos siendo consecuente con la geometría, la forma de aplicación de la carga y las condiciones de borde e interface entre los cuerpos, como objeto de calibración se toma la probeta experimental de serie S08-34-2 (ver figura 1) ensayada por (Yoo et al., 2011).

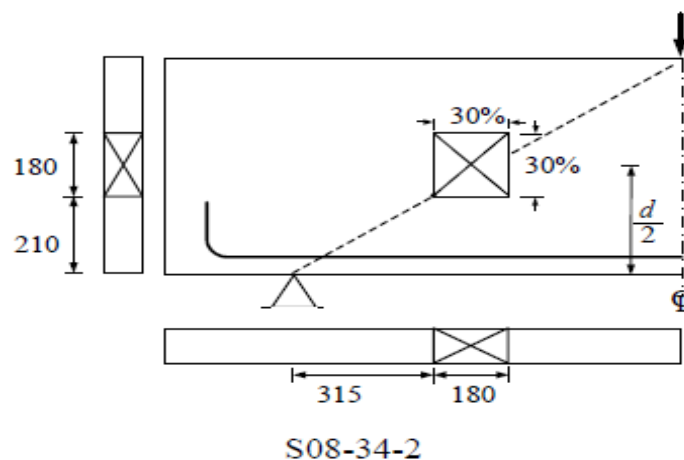


Figura 1 Esquema geométrico de la viga S08-34-2 ensayada por (Yoo et al., 2011). (Considerando en el dibujo solo la mitad de la viga por su simetría).

La probeta seleccionada es un viga simple de 2400 mm x 600 mm x 110 mm, donde las aberturas son cuadradas de 180 x 180 mm, la resistencia característica a compresión del hormigón es de 34 MPa y el refuerzo está constituido por dos barras de 20 mm de diámetro, con una tensión de fluencia de 500 MPa. El refuerzo de acero se discretiza con elementos T3D2 y para la viga de hormigón y las platinas de apoyo se utilizan los elementos finitos C3D8R, donde se ha demostrado que este tipo de elemento finito aproxima adecuadamente

los campos de desplazamientos en estructuras de hormigón armado y además tienen una geometría que se adapta muy bien a los volúmenes modelados, permitiendo así el recomendable mallado uniforme (Rodríguez et al., 2017).

Con el objetivo de validar las consideraciones asumidas para la modelación, se simularon otras probetas de los estudios experimentales de (Yoo et al., 2011) y en vigas continuas ensayadas por (Lee et al., 2008), estos modelos numéricos presentan una buena correspondencia donde para todos los casos se alcanza una aproximación en la capacidad resistente última menor del 5%, validándose así la modelación numérica dado el alto grado de precisión obtenida respecto a la experimentación.

En la figura 2, se muestran las curvas de carga contra desplazamiento reportadas en el estudio experimental de (Yoo et al., 2011) y las obtenidas en la simulación numérica. Puede observarse que el comportamiento en las probetas simuladas es similar al propuesto para cada una de ellas en el estudio experimental, alcanzándose además gran precisión en la estimación de la capacidad resistente y la elevada aproximación del campo de los desplazamientos de las estructuras simuladas.

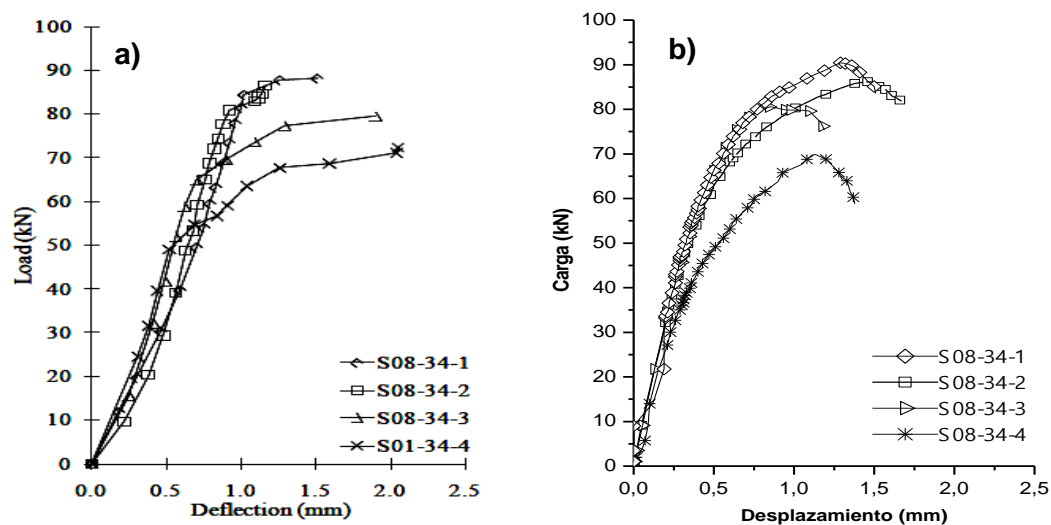


Figura 2 Curvas de carga vs desplazamientos. a) Experimental de (Yoo et al., 2011), b) Simulación de las probetas S08-34-1, S08-34-2, S08-34-3, S08-34-4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realiza un estudio preliminar del comportamiento de las vigas de gran peralte de hormigón armado con aberturas, partiendo de los resultados obtenidos en la simulación numérica de varias vigas previamente validadas y calibradas, resultados numéricos que permiten comprender mejor la evolución del estado tenso-deformacional y de la falla en la viga cuando es sometida a cargas estáticas. Además, se analiza la influencia que tienen

sobre la capacidad resistente la ubicación y forma de las aberturas, y la distribución del refuerzo principal, del refuerzo horizontal y vertical en el alma.

3.1 influencia de la posición de las aberturas

Utilizando la viga del estudio experimental de (Yoo et al., 2011), se realizan varios modelos con aberturas cuadradas de dimensiones 20 x 20 cm ubicadas en el peralte de la viga en tres posiciones: $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{2}{3}$ nombradas tope, centro y fondo respectivamente. En la luz de cortante se colocan siete posiciones: sobre el apoyo, a $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{3}$ y $\frac{3}{4}$ de este, en el centro y debajo del punto de aplicación de la carga (ver figura 3).

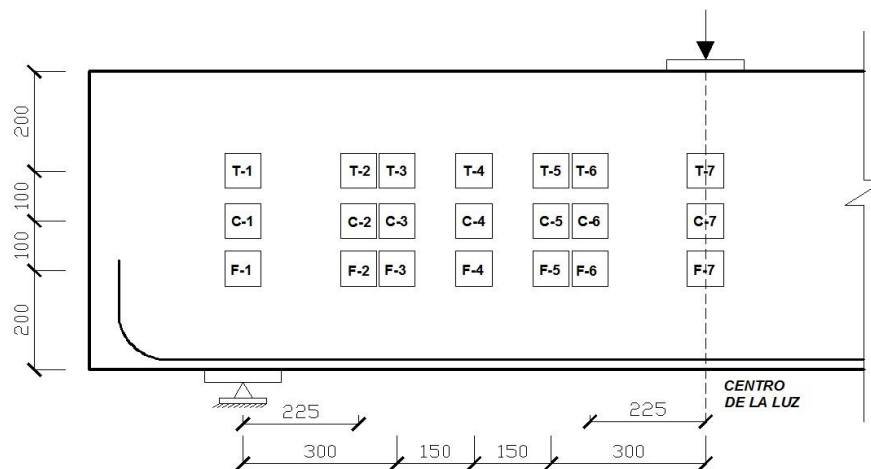


Figura 3 Posiciones evaluadas en la viga simple.

Se obtiene como resultado de este estudio que las posiciones más adecuadas para colocar las aberturas de las propuestas, son las ubicadas debajo del punto de aplicación de la carga preferentemente en el centro del peralte total de la viga, debido a que es el lugar donde se alcanza la mayor capacidad de carga.

En la figura 4 puede observarse que de ser necesario colocar una abertura en el centro de la luz de cortante debe realizarse a $\frac{2}{3}$ del peralte total de la viga respecto al borde superior (abertura F-4), pues una abertura ubicada en las demás posiciones evaluadas del peralte para esa posición de luz de cortante reduciría a más de la mitad la capacidad resistente de la estructura, debido a que son posiciones que se afectan en mayor medida la trayectoria de tensiones de la biela diagonal. Se evidencia además que a $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{3}$ de la luz de cortante respecto al apoyo la ubicación de una abertura disminuiría considerablemente la capacidad de carga de la viga, lo que indica que si se desea realizar una abertura cerca del apoyo la solución más conveniente sería colocarla encima de éste preferiblemente a $\frac{1}{3}$ y $\frac{1}{2}$ del peralte total de la viga (posiciones T-1 y C-1 respectivamente).

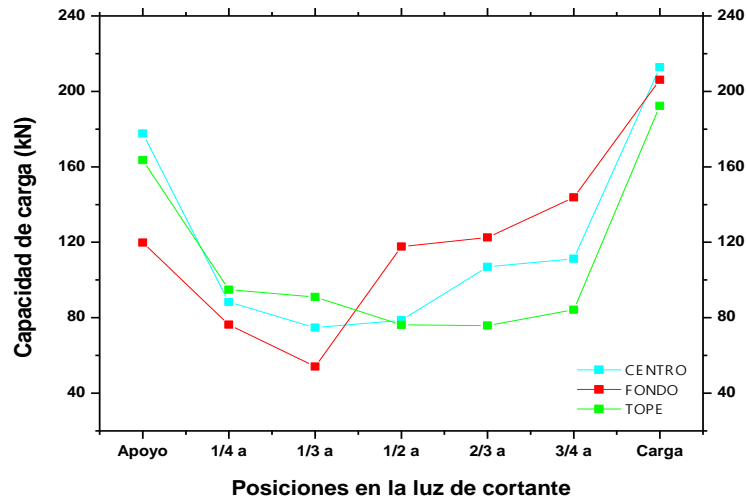


Figura 4. Influencia de las posiciones de las aberturas en la viga simple.

3.2 Influencia de la forma y dimensiones de las aberturas

Se simulan varios modelos donde se proponen diferentes formas geométricas de aberturas entre las que se encuentran las cuadradas, circulares y rectangulares con los lados largos extendidos tanto en dirección vertical como horizontal, para evaluar la influencia de este parámetro en la viga simple. Las aberturas son ubicadas en el centro de la luz de cortante y en tres posiciones del peralte total de la viga: a $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{2}{3}$ de este respecto al borde superior, manteniendo fija el área de la abertura en todos los modelos (ver figura 5).

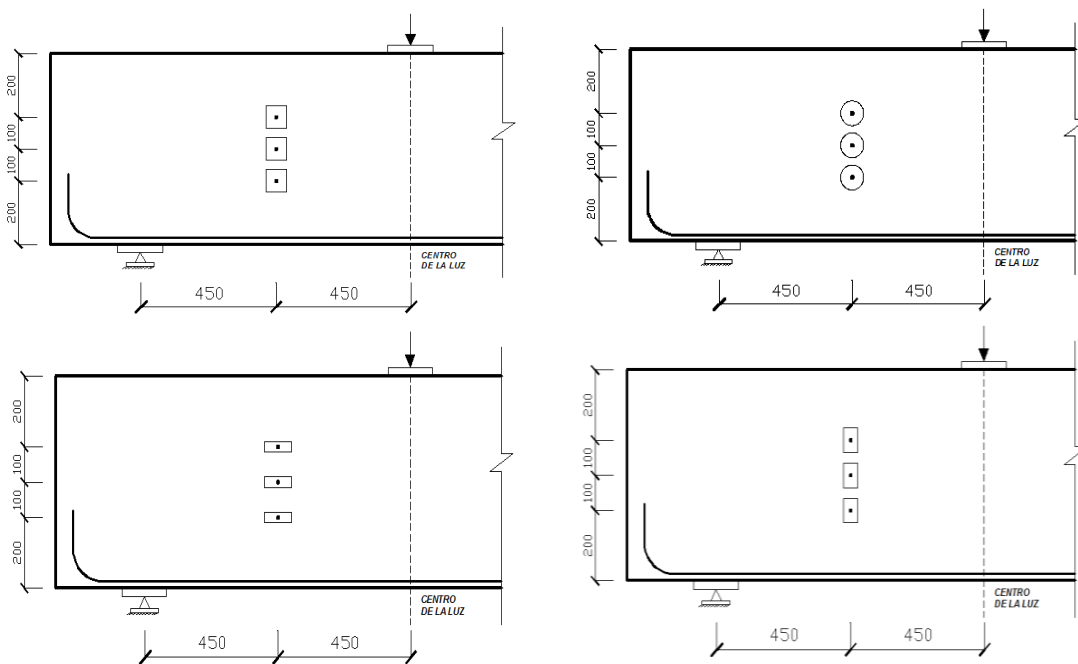


Figura 5. Diferentes formas de aberturas evaluadas en la viga simple. Considerando en la imagen solo la mitad de la viga por su simetría.

En este estudio se observa en la figura 6, que en todas las formas evaluadas la posición más favorable para colocar las aberturas sea a $\frac{2}{3}$ del peralte total respecto al borde superior debido a que es el lugar donde se alcanza la mayor capacidad de carga en la estructura. Además, se observa que la abertura rectangular con los lados largos extendidos en dirección horizontal ofrece valores superiores de capacidad de carga en comparación con la abertura rectangular en la vertical, pues esta última forma incide significativamente en la trayectoria de la biela diagonal provocando una disminución de la capacidad resistente.

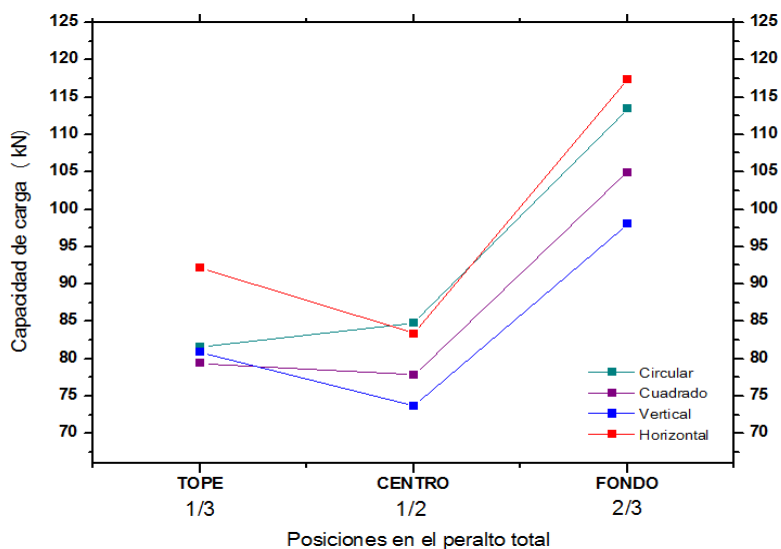


Figura 6. Influencia de las formas de las aberturas en las vigas modeladas.

Si se desea colocar una abertura en el centro del peralte total de la viga es recomendable realizarla de forma circular o rectangular con los lados largos extendidos en dirección horizontal, pues son las formas que ofrecen valores superiores de capacidad de carga en esa posición. Se evidencia que la forma circular para la abertura es más conveniente que la cuadrada debido a que afecta en menor medida la capacidad resistente de la viga estudiada. Puede observarse además que para $\frac{1}{3}$ del peralte total de la viga respecto al borde superior la forma más adecuada es la abertura rectangular con los lados largos extendidos en dirección horizontal y los valores de capacidad de carga de las demás formas estudiadas en esta posición no tienen mucha variabilidad, lo que indica que no influyen las formas de las aberturas pues se afecta de manera similar la capacidad resistente de la viga.

3.3 Influencia de la distribución del refuerzo

Para evaluar la influencia que tiene el refuerzo colocado alrededor de la abertura se realizan varios modelos utilizando probetas con aberturas cuadradas de 15 x 15 cm, ubicadas en el centro del peralte total de la viga y con cercos @ 180 mm (ver figura 7).

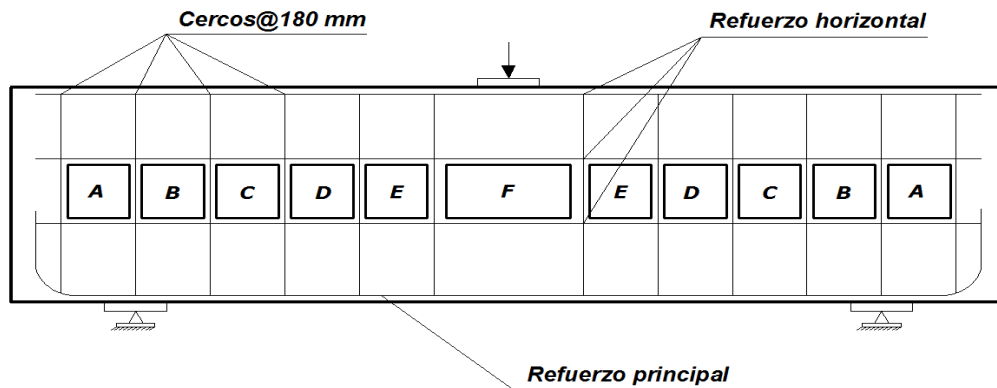


Figura 7. Influencia de la distribución del refuerzo en la viga simple con aberturas.

En este estudio se emplean diámetros de cercos y acero horizontal en un rango de 8 mm hasta 10 mm y la configuración del acero principal se encuentra en un rango de 19 mm hasta 21 mm y para resistencias a la compresión del hormigón de 25 y 35 MPa.

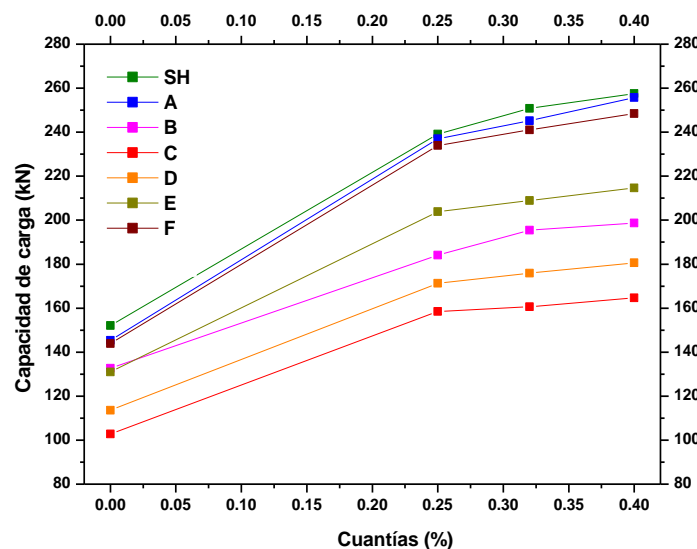


Figura 8. Efecto del refuerzo vertical en vigas con y sin aberturas para f'_c de 35 MPa.

Es la posición de abertura C la que exhibe valores de capacidad de carga inferiores en comparación con las demás posiciones propuestas para las diferentes cuantías de refuerzo vertical, sin embargo, se observa que son las posiciones A (en voladizo) y F (debajo del punto de aplicación de la carga) las zonas que más se acercan a los valores de capacidad de carga de la viga sin aberturas, comportamiento similar a lo observado en la viga simple sin refuerzo vertical. También es de resaltar en la figura 8, como en todas las posiciones propuestas, el incremento aproximadamente en un rango del 25 al 30% de capacidad resistente de las vigas cuando se coloca refuerzo vertical y horizontal, debido al aporte significativo de este tipo de refuerzo al tomar las tracciones transversales producto de la compresión de la biela, evitando el incremento de las grietas, sin embargo, cuando se

incrementa la cuantía del refuerzo vertical, el aumento de la capacidad de carga de la viga no es tan significativo. A partir de esta observación se recomienda para incrementar la capacidad resistente en la viga colocar acero vertical y no aumentar la cuantía.

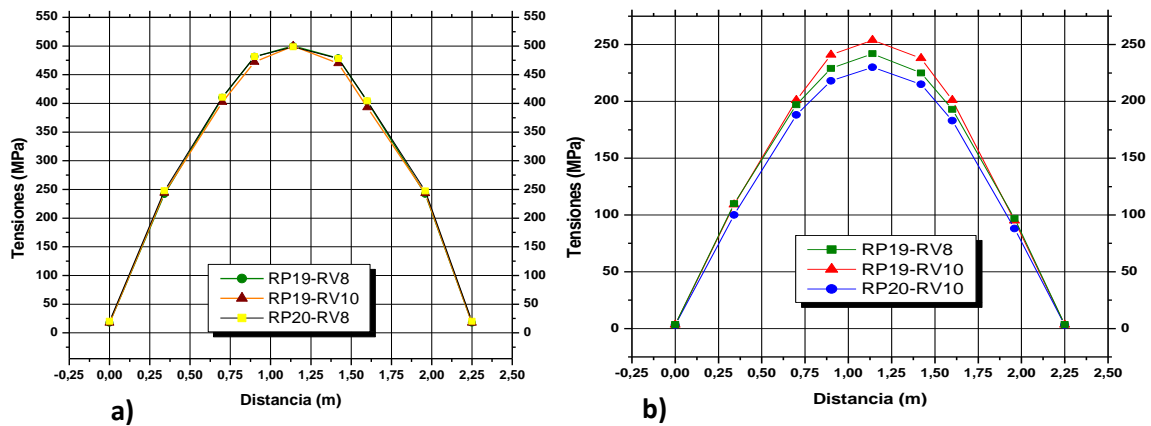


Figura 9. Tensiones en el refuerzo principal: a) viga sin abertura, b) viga con abertura en C.

Con el objetivo de conocer las tensiones en el refuerzo principal en la viga sin abertura, se realiza la lectura de las mismas para la carga de falla en toda la longitud de la barra de refuerzo principal de diámetro de 19 y 20 mm, considerando para el caso de refuerzo vertical barras de acero de 8 y 10 mm de diámetro. Puede observarse (ver figura 9a) que para todas las configuraciones empleadas de refuerzo principal y vertical, el acero alcanza su límite de fluencia (500 MPa), incluso aumentando el diámetro de refuerzo principal, por tanto, las barras de acero de 20 mm como refuerzo principal no son suficientes para tomar las tracciones en el tirante. Se obtiene como resultado (ver figura 9b), que en todas las configuraciones utilizadas, el refuerzo trabaja aproximadamente a la mitad de su capacidad, lo que conduce a plantear que la falla de la estructura estaría condicionada por la presencia de la abertura en la posición C, por tanto para obtener mayores valores de capacidad de carga no sería conveniente colocar mayores diámetros de barras de refuerzo principal.

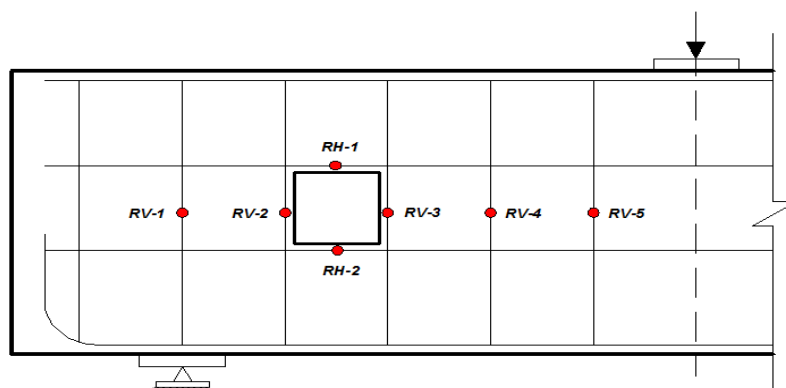


Figura 10. Tensiones en el refuerzo vertical y horizontal en la posición C.

También son tomadas diferentes lecturas de tensiones en las barras de refuerzo vertical y horizontal para la carga de falla, los puntos seleccionados para el estudio (ver figura 10) están ubicados alrededor y cerca de la abertura que exhibe los menores valores de capacidad resistente (posición C) en comparación con las demás posiciones analizadas.

Tabla 1. Valores de tensiones en las barras de refuerzo vertical y horizontal.

Refuerzo		Tensiones en el acero (MPa)						
Principal	Secundario	RV-1	RV-2	RV-3	RV-4	RV-5	RH-1	RH-2
Φ 20 mm	Φ 8 mm	21	22	157	91	6	19	164
	Φ 9 mm	21	20	125	75	3	14	170
	Φ 10 mm	23	19	109	70	3	38	161

Los resultados de la tabla 1 demuestran que las barras que toman mayores tensiones son las ubicadas en la cara inferior y en el lateral derecho de la abertura (puntos RH-2 y RV-3 respectivamente), además de la barra ubicada hacia la derecha (punto RV-4). Se puede resaltar que el trabajo de este refuerzo es favorable en el comportamiento de la estructura y en la ductilidad de la falla, sin embargo, se observa que en las variantes analizadas este refuerzo no alcanza el 35 % de su tensión de fluencia debido a que el hormigón falla por cortante diagonal que condiciona la capacidad resistente de la viga.

CONCLUSIONES

- Se ha comprobado la factibilidad de estudiar las estructuras de hormigón armado con predominio de esfuerzos cortantes, en particular el comportamiento de las vigas de gran peralte con aberturas, a través de la simulación numérica, observándose una buena correspondencia entre los resultados numéricos y los experimentales de referencia, donde se logran aproximaciones menores que el 5%.
- La modelación en combinación con la experimentación constituye una poderosa herramienta para el estudio de las vigas de gran peralte con aberturas, posibilitando el análisis del comportamiento de este tipo de estructuras a un costo mínimo de recursos, aspecto muy importante dada la complejidad técnica y el alto costo-material que implicaría en nuestro país realizar estudios experimentales de este tipo
- La posición más adecuada para colocar una abertura es debajo del punto de aplicación de la carga en el centro del peralte total de la viga.
- La abertura rectangular con los lados largos extendidos en dirección horizontal ofrece valores superiores de capacidad de carga en comparación con la abertura rectangular en el sentido vertical.

- La forma circular para la abertura es más conveniente que la cuadrada debido a que afecta en menor medida la capacidad resistente de la viga estudiada.
- Cuando se coloca refuerzo vertical y horizontal en las vigas simples, es notable el incremento aproximadamente en un rango del 25 al 30% de capacidad resistente de estos elementos, debido al aporte de este refuerzo al cosido de las grietas, sin embargo, cuando se incrementa la cuantía del refuerzo vertical, el aumento de la capacidad de carga de la viga no es tan significativo.
- El refuerzo principal de 20 mm de diámetro para las vigas simples estudiadas con la presencia de refuerzo vertical y horizontal no es suficiente en el tirante, donde se observa que en los casos analizados este refuerzo alcanza la fluencia.
- En la viga simple con aberturas ubicadas en posiciones desfavorables no es necesario aumentar los diámetros de refuerzo debido a que la falla de la estructura estaría condicionada por la presencia de la abertura.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

ABAQUS: *User's Manual, Version 6.14-1*, Hibbitt, Karlson and Sorensen, Inc, 2014.

ALI, A. Y., ALWASH, N. A., Y MOSHEER, K. A.: «Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete deep beams with opening», *Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences*, 2(2), 229–244, 2009.

AMIN, H. M., AGARWAL, V. C., Y AZIZ, O. Q.: «Effect of opening size and location on the shear strength behavior of reinforced concrete deep beams without web reinforcement», *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 3(7), 28–38, 2013.

ASHOUR, A. F., Y RISHI, G.: «Tests of reinforced concrete continuous deep beams with web openings», *ACI Structural Journal*, 97(3), 418–426, 2000.

BONILLA, J. D... ET AL.: «Numerical modeling with experimental validation applied to the study of stud connectors behavior in concrete and steel composite structures», *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(1), 53–68, 2015. doi:10.4067/S0718-50732015000100005

CAMPIONE, G., Y MINAFÒ, G.: «Behaviour of concrete deep beams with openings and low shear span to depth ratio», *Engineering Structures*, 41, 294–306, 2012. doi:10.1016/j.engstruct.2012.03.055

HERNÁNDEZ, H., BONILLA, J. D., Y RODRÍGUEZ, G.: «Study of the behavior of composite beams made of concrete and steel by using numerical simulation». *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(1), 5–21, 2014. doi:10.4067/S0718-50732014000100001

- KONG, F. K., Y SHARP, G. R.: «Structural idealization for deep beams with web openings», *Magazine of Concrete Research*, 29 (99), 81, 1977.
- LEE, J. K., LI, C. G., Y LEE, Y. T.: *Experimental study on shear strength of reinforced concrete continuous deep beams with web opening*. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 12–17). Beijing, China, 2008.
- MOHAMED, A. R., SHOUKRY, M. S., Y SAEED, J. M.: «Prediction of the behavior of reinforced concrete deep beams with web openings using finite element method», *Alexandria Engineering Journal*, 53, 329–339, 2014. doi:10.1016/j.aej.2014.03.001
- NAIR, N., Y KAVITHA, P. E.: «Effect of openings in deep beams using strut and tie model method», *International Journal of Technical Research and Applications*, 3(5), 59–62, 2015.
- RODRÍGUEZ, G., BONILLA, J. D., Y HERNÁNDEZ, J. J.: «Study of the behavior of reinforced concrete deep beams. Estimate of the ultimate shear capacity», *Revista de La Construcción*, 16(1), 43–56, 2017. doi:10.7764/RDLC.16.1.43
- SÁNCHEZ, E., RODRÍGUEZ, G., Y BONILLA, J. D.: «Estudio del comportamiento de vigas continuas de gran peralte de hormigón armado mediante modelación numérica», *Universidad & Ciencia*, 5(1), 107–122, Ciego de Ávila, 2016.
- TAN, K. H., TONG, K., Y TANG, C. Y.: «Consistent strut-and-tie modelling of deep beams with web openings», *Magazine of Concrete Research*, 55(1), 65–75, 2003.
- YANG, K. H., Y ASHOUR, A. F.: «Structural behaviour of reinforced-concrete continuous deep beams with web openings», *Magazine of Concrete Research*, 59(10), 699–711, 2007. doi:10.1680/mac.2007.59.10.699
- YANG, K. H., EUN, H. C., Y CHUNG, H. S.: «The influence of web openings on the structural behavior of reinforced high-strength concrete deep beams», *Engineering Structures*, 28(13), 1825–1834, 2006.
- YOO, T. M., DOH, J. H., GUAN, H., Y FRAGOMENI, S.: «Experimental behaviour of high strength concrete deep beams with web openings», In *The Structural Design of Tall and Special Buildings* (pp. 1–19), 2011.