

MODELACIÓN NUMÉRICA DE MÉNSULAS DE HORMIGÓN ARMADO UTILIZANDO ESTUDIOS EXPERIMENTALES COMO PATRONES DE CALIBRACIÓN

NUMERICAL MODELING OF ARMED CONCRETE MÉNSULAS USING EXPERIMENTAL STUDIES AS CALIBRATION PATTERNS

Autores: Ing. Yaneivy Martínez Padrón¹

Danais Rodríguez Peña¹

Dr. Ing. Jorge Douglas Bonilla Rocha¹

Dr. Ing. Juan José Hernández Santana²

Institución: ¹Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez,

²Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba

Correo electrónico: yaneivy@unica.cu

RESUMEN

En este trabajo se realizó la modelación numérica de ménsulas de hormigón armado empleando el programa computacional ABAQUS (Versión 6.13.1), es un valioso programa de propósito general que se encuentra sustentado en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Para la modelación de los materiales en el caso del acero se utilizó un modelo bilineal con criterio de rotura de von Mises y un modelo de daño plástico para el hormigón. Se definieron las condiciones de borde e interface entre los cuerpos que componen el modelo, además de todo el proceso de calibración, vinculado a la selección del tipo de elemento finito y la densidad de malla óptima, acorde con un adecuado costo computacional. Para la validación de la simulación se compararon los resultados numéricos con el ensayo experimental de referencia obteniendo buena correspondencia y se aprecian los fenómenos tenso-deformacionales que se producen en el interior de la estructura imposibles de observar en el ensayo experimental.

Palabras clave: Ménsulas de hormigón armado, Método Elementos Finitos, Simulación numérica.

ABSTRACT

In this work comes true the numerical modelation of shelves of reinforced concrete employing the computational program ABAQUS/CAE (Version 6.13.1). It is general purpose that finds itself held on basis of the Finite-Element Method (FEM). For the modelation of the materials in the case of steel was used a bi-linear model with opinion of breaking of von Mises and a model of plastic damage for concrete. They define the conditions of border and interface between the bodies that compose the model, in addition to the whole process of calibration, once the selection was linked of the type of finite element and the density of optimal mesh, chord with an adequate computational cost. Forth validation of simulation the numerical results compared with the experimental references say obtaining good mail. Phenomena appraise tense deformacionales themselves that they take place in the impossible inside of the structure to observe in the experimental essay.

Keywords: Reinforced concrete corbels, Finite Element Method, Numerical simulation.

INTRODUCCIÓN

El código ACI 318S-05 define las ménsulas como voladizos que tienen relación luz de cortante - altura, menores que la unidad y tienden a actuar como cerchas simples o vigas de gran altura más que como elemento a flexión diseñados para cortante. Para su estudio la experimentación ha sido el punto de partida en el desarrollo de los primeros métodos de cálculo, así lo demuestran los trabajo de Kriz y Raths (1965); Mattock (1976); Fattuhi (1990).

Actualmente existe la tendencia de utilizar la simulación numérica como herramienta para estudiar el comportamiento de estructuras de hormigón armado, impulsado por el alto desarrollo de poderosas herramientas computacionales que permiten el análisis tenso-deformacional de sólidos, además de la gran dificultad que implica realizar estudios experimentales de este tipo de elemento, con una alta complejidad técnica y un elevado costo material. Entre estas herramientas se pueden mencionar el ABAQUS, ANSYS,

COSMOS, NASTRAN, LUSAS, entre otros; considerados programas de propósitos generales, basados en el Método de Elementos Finitos (MEF).

Son numerosos los investigadores del ámbito internacional y nacional que han utilizado estas herramientas. Campione (2009), estudia el comportamiento de ménsulas de hormigón armado simples y con fibras, utilizando el software (ATENA-2D); Danying y Junwei (2010) estudiaron 12 ménsulas reforzadas con fibras de acero en ANSYS; Rezaei et al. (2012) emplean el LUSAS para el estudio de ménsulas de hormigón armado, obteniendo una desviación máxima del 15% en correspondencia con los valores experimentales. En la bibliografía consultada existen varios ejemplos de modelación numérica mediante el empleo del software ABAQUS, específicamente para la simulación de ensayos de conectores como son los trabajos de Lam y Ellobody (2005); Ellobody y Young (2006); Bonilla (2008); además de Hernández (2014); también para el estudio de vigas de gran peralte de hormigón armado se destacan los trabajos de Rodríguez (2013) y Sánchez (2014).

En este trabajo para la modelación de ménsulas de hormigón armado en ABAQUS, se ha considerado la no linealidad del acero y del hormigón. Se plantea además el procedimiento para acometer la simulación virtual del ensayo de ménsulas, tratándose aspectos relacionados con la concepción geométrica del modelo, la aplicación de las cargas horizontales y verticales, así como la definición de las condiciones de borde e interface entre los cuerpos que componen la probeta. Se aborda todo el procedimiento para la calibración, vinculado a la selección del tipo de elemento finito y en la selección de la densidad de malla óptima. Finalmente se realiza la validación de las consideraciones y simplificaciones utilizadas comparando los resultados numéricos con los experimentales de referencia.

Descripción del espécimen

La probeta seleccionada como patrón de calibración fue la N^o 2 de la serie C del estudio experimental realizado por Mattock et al. (1976). La misma es una ménsula doble de hormigón armado con una columna de soporte de 304.8x152.4 mm de sección transversal. Con una luz de cortante (a) ubicada a

152.4 mm de la cara de la columna y una resistencia a compresión del hormigón de 25.6 MPa. El refuerzo de la columna lo conforman 4 barras # 4 (12.7 mm) para el acero longitudinal y barras # 2 (6.35 mm) espaciadas a 152.4 mm para los estribos con una tensión de fluencia de 334.4 MPa y 464.7 MPa respectivamente. Para la ménsula el refuerzo principal está compuesto por 3 barras # 6 (19.1 mm) con una tensión de fluencia de 347.5 MPa y para el refuerzo secundario 2 cercos # 2 (6.35 mm) espaciados a 76.2 mm.

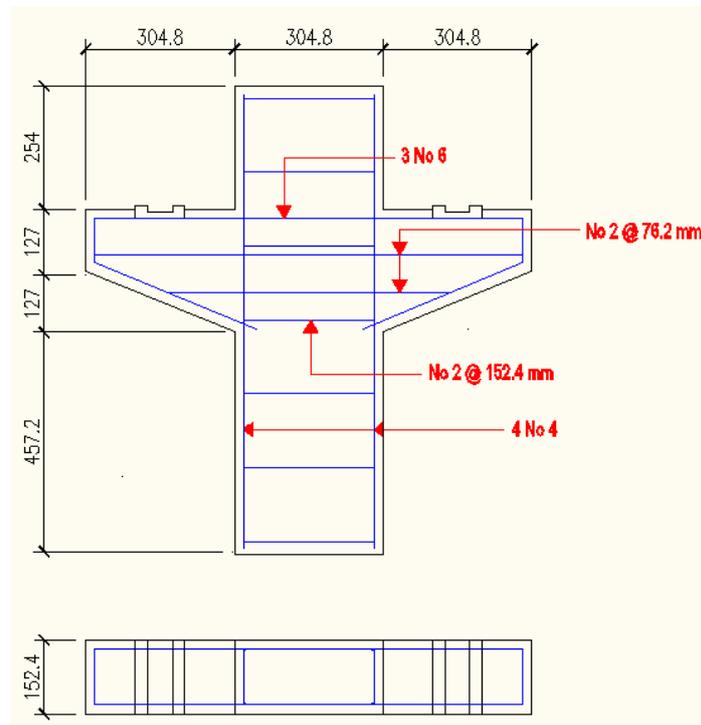


Figura 1. Detalle del espécimen.

Modelación numérica del ensayo de ménsulas de hormigón armado.

Modelación de la geometría

A partir de las facilidades en cuanto a representación geométrica que brinda ABAQUS/CAE y siendo consecuente con el ensayo de ménsulas, se ha adoptado la modelación tridimensional de la probeta (3D) tratando de respetar la forma de los volúmenes que componen el modelo real con la mayor fidelidad posible.

- a) Armadura de refuerzo: El módulo PARTE permite crear una malla en el plano mediante elementos lineales (wire) que con un posterior ensamblaje se puede

confeccionar una armadura tridimensional que representa el refuerzo de la ménsula, al crear secciones en el módulo de PROPIEDADES se puede asignar las áreas de acero de las barras en dependencia de los diámetros.

- b) Ménsula de hormigón: Estructura cuya forma representa el volumen de hormigón de la ménsula, posteriormente esta parte es ensamblada con las platinas de apoyo y de carga formando así el esquema principal del modelo.

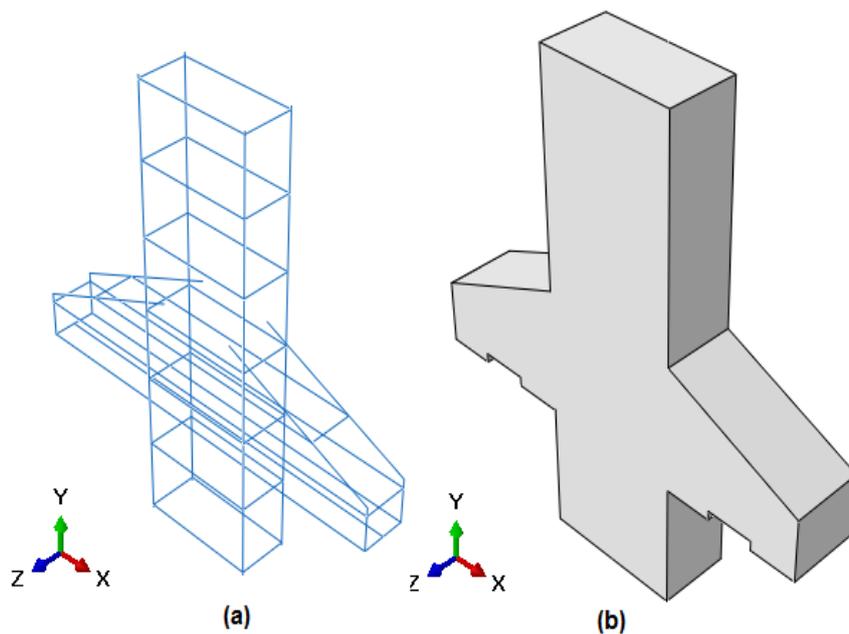


Figura 2. Detalles de la probeta virtual: (a) Malla de refuerzo; (b) Geometría de la ménsula.

- c) Platinas de carga y apoyo: Estructuras de acero que tienen la función de distribuir las cargas aplicadas en toda el área que estas ocupan sobre la ménsula de hormigón, evitando la concentración de tensiones en un área pequeña.

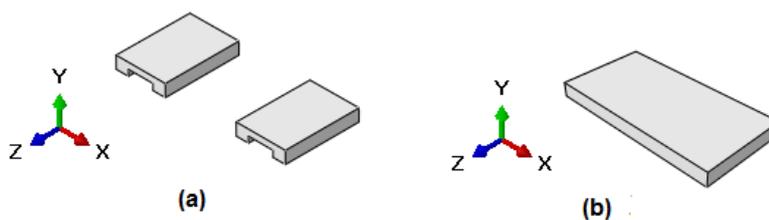


Figura 3. Detalles de la probeta virtual: (a) Platinas de apoyos (b) Platina de carga.

Modelación de las condiciones de borde

- a) Barras de refuerzo: La interface barra de acero-hormigón es tratada como rígida y se logra embebiendo en el volumen de hormigón la armadura de refuerzo en el módulo INTERACCIÓN con el comando CreateContrain-EmbeddedRegion del ABAQUS.
- b) Ménsula de hormigón: elemento que interactúa directamente con las platinas de carga y de apoyo, además de la interface barras de acero-hormigón antes explicada. Debe tenerse en cuenta las condiciones de borde tomadas para simular el procedimiento del ensayo experimental. La interface ménsula de hormigón-platina de apoyo o de carga es tratada como rígida, debido a la presencia de la elevada fuerza de fricción, provocada por los grandes esfuerzos normales que no permiten el desplazamiento en la interface, este efecto se logra en el módulo de ENSAMBLAJE del ABAQUS con el comando Merge/CutIntances-Retain.

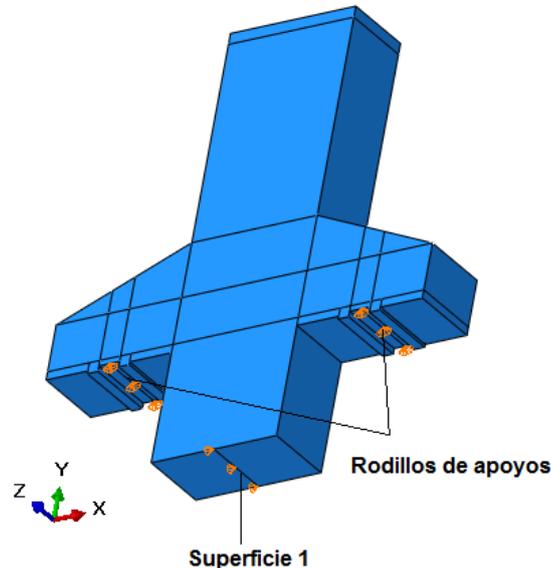


Figura 4. Detalle de la probeta virtual y sus condiciones de borde.

La Superficie 1 ver figura 4 es una partición que se crea para restringir el desplazamiento en el eje X y se permite el desplazamiento en los ejes Y y Z, aspecto que posibilita el equilibrio estático del modelo numérico dado por las condiciones planteadas para los apoyos.

- c) Platinas de apoyo: físicamente se apoyan tangencialmente sobre un rodillo, donde este impide el desplazamiento vertical y permite horizontal, en el modelo numérico esto es simulado como una línea que representa la zona de tangencia entre el rodillo y la platina. En los apoyos se restringe el desplazamiento en los ejes Y y Z y se libera el desplazamiento en el eje X simulando así al rodillo del apoyo que actúa como una articulación.

Aplicación de la carga

La carga es transmitida hacia la ménsula a través de las platinas de cargas que evitan la concentración de las tensiones en un área pequeña de hormigón en forma similar al experimento real. La carga horizontal es aplicada en las platinas de apoyo con un valor constante, y antes de comenzar con los incrementos de carga vertical en correspondencia con el experimento real. Los incrementos de carga vertical son aplicados de forma distribuida en la parte superior de la platina de carga *ver fig. 5* en pequeños intervalos, donde el tamaño de estos es seleccionado automáticamente por el ABAQUS basado en las condiciones de convergencia numérica. En este caso, la carga es aplicada utilizando el algoritmo RIKS modificado, el cual se encuentra disponible en el ABAQUS, donde la base de dicho algoritmo es el método de Newton y que generalmente es utilizado para predecir la inestabilidad no lineal y el colapso de una estructura.

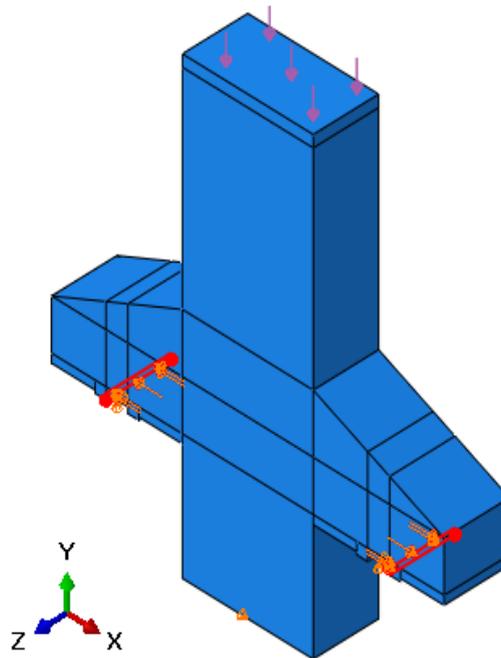


Figura 5. Esquema de carga en la estructura.

Modelación de los materiales

Modelación del acero

Tomando como base la experiencia internacional sobre la simulación numérica de estructuras compuestas Lam y Ellobody (2005), Ellobody y Young (2006), Bonilla et al. (2007a) (2007b) (2007c), Bonilla (2008), Rodríguez (2013), Díaz (2013), Sánchez (2014), para el caso del acero se adoptó un comportamiento bilineal, con criterio de rotura de Von Mises. Para definir las propiedades de este material ha sido empleado el comando PLASTIC del código ABAQUS.

Modelación del hormigón

Para modelar el comportamiento del hormigón en su etapa no lineal se ha utilizado el Modelo de Daño Plástico (Concrete Damage Plasticity), implementado en el código ABAQUS. Dicho modelo reproduce adecuadamente el comportamiento no lineal del hormigón y ha sido seleccionado teniendo en cuenta los buenos resultados obtenidos en los estudios precedentes de Bonilla et al. (2007 b), Bonilla (2008), Rodríguez (2013), Hernández (2014), Sánchez

(2014) donde se ha obtenido buena correspondencia entre la modelación virtual y la experimentación. En este trabajo no se reportan los detalles relacionados con la calibración del anterior modelo, pero pueden ser observados en los trabajos anteriormente citados.

Estudio y selección de tipo de elemento finito a emplear

ABAQUS cuenta en su biblioteca de elementos sólidos (3D) con tres tipologías diferentes: los prismáticos de seis lados, prismáticos de cinco lados (cuñas) y tetraedros (pirámide de base triangular), los cuales pueden pertenecer a las familias lagrangeanas o serendípita indistintamente (ver figura 6).

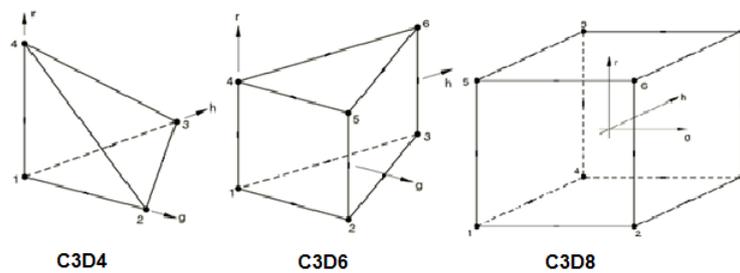


Figura 6. Geometrías de los elementos finitos (3D) implementados en ABAQUS.

Tomando como variable de control la capacidad resistente última a cortante de la probeta ensayada se muestran en la *Tabla 1*, los resultados de la simulación numérica para diferentes configuraciones de tipos de elementos manteniendo las mismas condiciones de borde, magnitud de la carga, así como propiedades físicas de los materiales.

Configuración	Región	Elemento	Capacidad de Carga (kN)	Diferencia (%)
A	Hormigón	C3D4	200	12.6
	Platina	C3D4		
	Refuerzo	T3D2		
B	Hormigón	C3D6	217	22.2
	Platina	C3D6		
	Refuerzo	T3D2		
	Hormigón	C3D8R		

C	Platina	C3D48R	171	4.04
	Refuerzo	T3D2		
Probeta C2 del ensayo experimental Mattock et al. (1976).			177.93	-

Tabla 1. Resultados de la simulación virtual con diferentes tipos de elementos.

Observando que la configuración (C) arroja los mejores resultados con una diferencia de 4.04% en relación con el valor experimental, es importante resaltar que esta configuración además de presentar mejor aproximación, los elementos que la componen presentan una geometría que se adapta muy bien a los volúmenes modelados, permitiendo así un mallado más uniforme. Estos resultados se corresponden con los obtenidos en las investigaciones de Rodríguez *et al.* (2012), Rodríguez (2013) y Sánchez (2014).

Estudio y selección de la densidad de la malla óptima

No es suficiente conocer el tipo de elemento finito a utilizar, también es necesario determinar el tamaño adecuado para estos, acorde con el costo computacional, aspecto que es relativo, pues depende de la tecnología con que se cuente en materia de hardware. En la *Tabla 2* se muestra la densidad de malla que se utilizó en cada uno de los modelos para las diferentes partes, así como la capacidad de carga obtenida y el error en tanto por ciento en relación con la experimentación tomada para la calibración.

Densidad de Malla	Región	Cant. Elementos	Cant. Nodos	Cap. de Carga (kN)	Dif. (%)	Tiempo Aproximado
MEF (A)	Solidos	708	1136	167.387	-5.92	53 seg
	Armadura	383	350			
MEF (B)	Solidos	1160	1705	170.735	-4.04	1 min
	Armadura	419	386			28 seg
	Solidos	1256	1845			

MEF (C)	Armadura	452	419	175.598	-1.31	2 min 10 seg
	Solidos	1320	1935			
MEF (D)	Armadura	459	426	179.886	1.10	2 min 53 seg
Probeta C2 del ensayo experimental Mattock et al. (1976).				177.929	-	-

Tabla 2. Configuración del modelo para diferentes densidades de malla.

Se observa la evolución favorable que va teniendo el valor de capacidad resistente en la medida que se densifica la malla y como dicho valor se va aproximando mejor al valor experimental, obteniendo en todos los casos valores menores del 6 % a un bajo costo computacional. Los mejores resultados se corresponden con las configuraciones (C) y (D) con diferencias respecto al valor experimental menor al 2 %. Finalmente se decide adoptar la densidad de malla de la configuración MEF (D) con un tamaño aproximado de 0.0375 m.

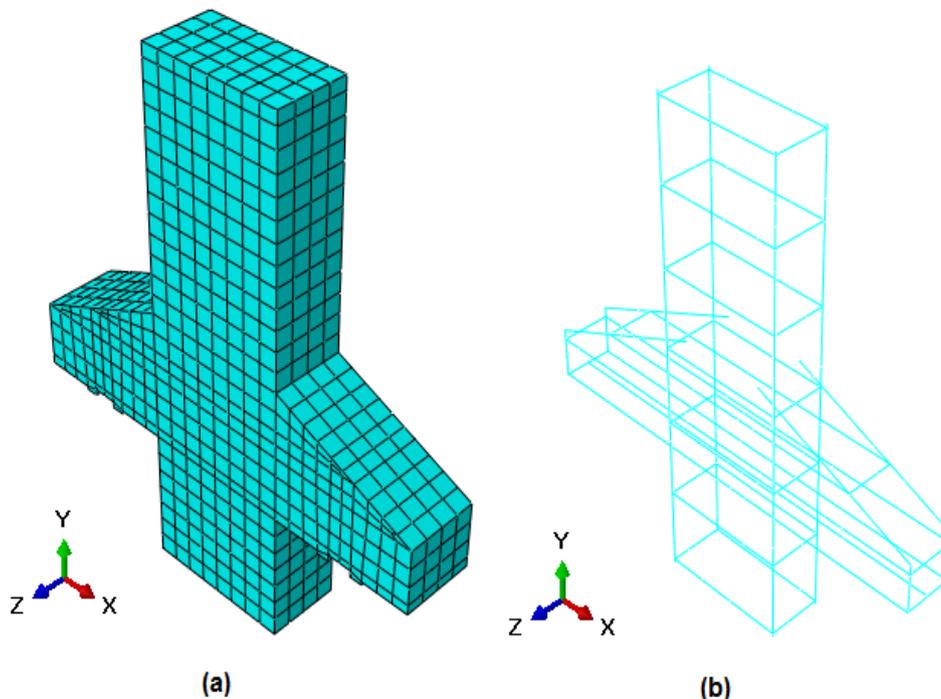


Figura 7. Modelo discreto MEF (D): a) Ménsula de hormigón y Platinas b) Acero de refuerzo

Comportamiento tenso-deformacional

Aprovechando las bondades brindadas por la simulación en ABAQUS se muestra a continuación el comportamiento tenso-deformacional de la ménsula modelada. Los resultados gráficos mostrados se toman para diferentes incrementos de carga, hecho que posibilita observar detalladamente la evolución del comportamiento en esta estructura y sus particularidades a medida que se incrementa la carga.

En la Figura 8 se observa la concentración de las tensiones en la masa de hormigón y el refuerzo, que para el tercer incremento de la carga los mayores valores de tensiones comienzan a aparecer en la zona de la aplicación de la carga horizontal, en el caso del refuerzo se observa como el acero principal comienza a tomar los esfuerzos provocados por las tracciones de la fibra inferior de la ménsula, que no son muy significativos debido a que la magnitud de la carga es pequeña.

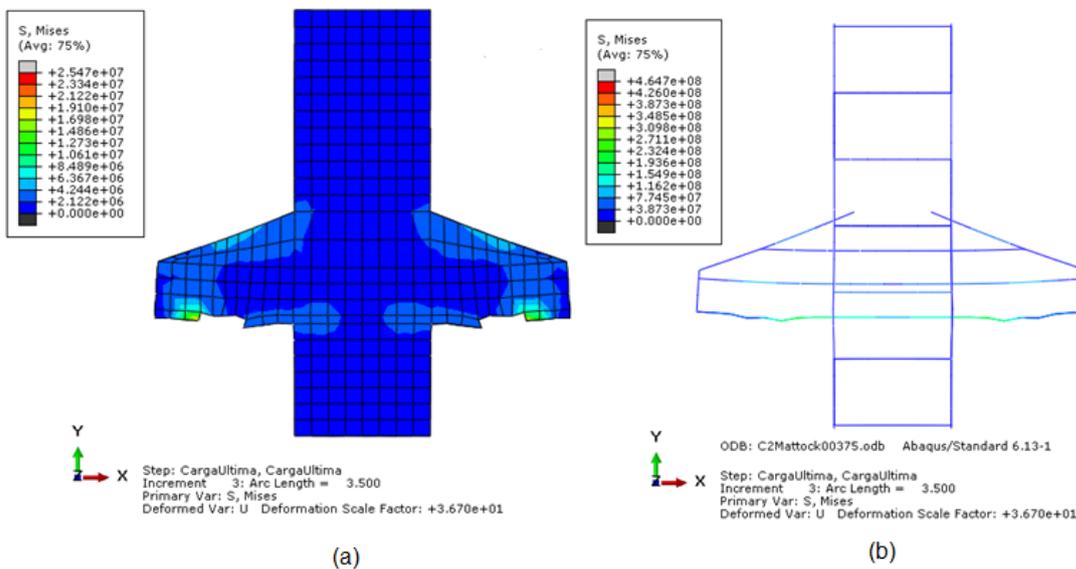


Figura 8. Concentración de tensiones para el 3er incremento de carga: a) hormigón;b) acero de refuerzo.

Para el incremento dieciséis de la carga Figura 9 las tensiones aumentan considerablemente y se define la forma de la biela diagonal de compresión, en este instante la carga horizontal se terminó de aplicar y la carga vertical está siendo aplicada. En el caso del acero las tensiones se incrementan y se

observa como el acero secundario comienza a tomar mayores valores de tensiones, esto se debe a que la cuantía del acero secundario es mucho menor que la cuantía del acero principal.

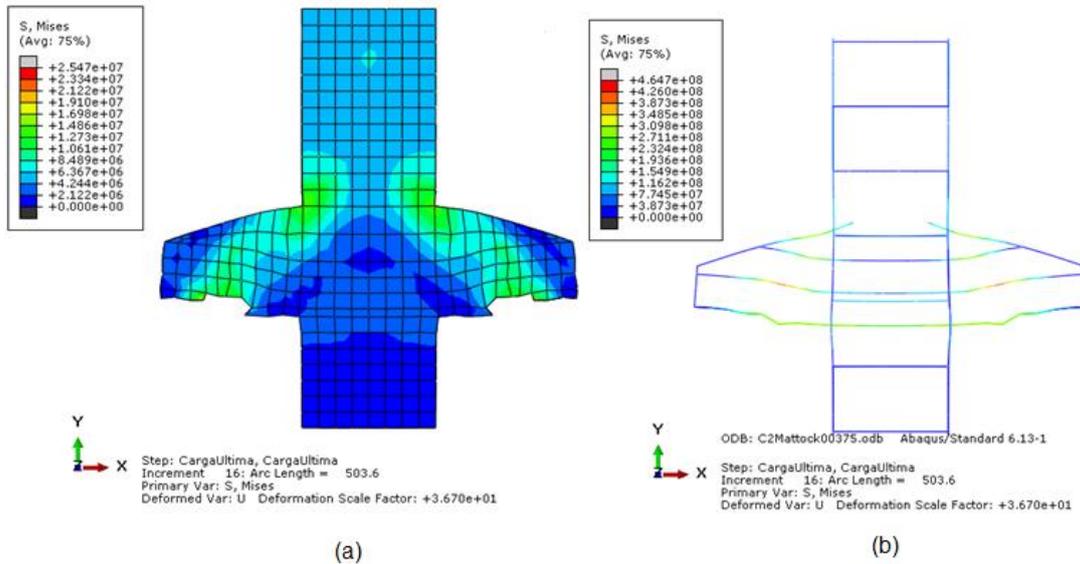


Figura 9. Concentración de tensiones para el incremento dieciséis de carga: a) hormigón;b) acero de refuerzo.

Para el incremento veintiuno Figura 10, se produce el fallo de la estructura, debido al incremento de las tensiones comienzan a aparecer las grietas y se observa como la biela de hormigón es separado producto de la grieta por cortante formada entre la zona de los apoyos y la unión de la ménsula y la columna, zona donde se observa la mayor concentración de tensiones, para el refuerzo se evidencia como el acero secundario se encuentran trabajando al máximo en la zona donde aparece la grieta por cortante mientras que en el acero principal las tensiones son menores.

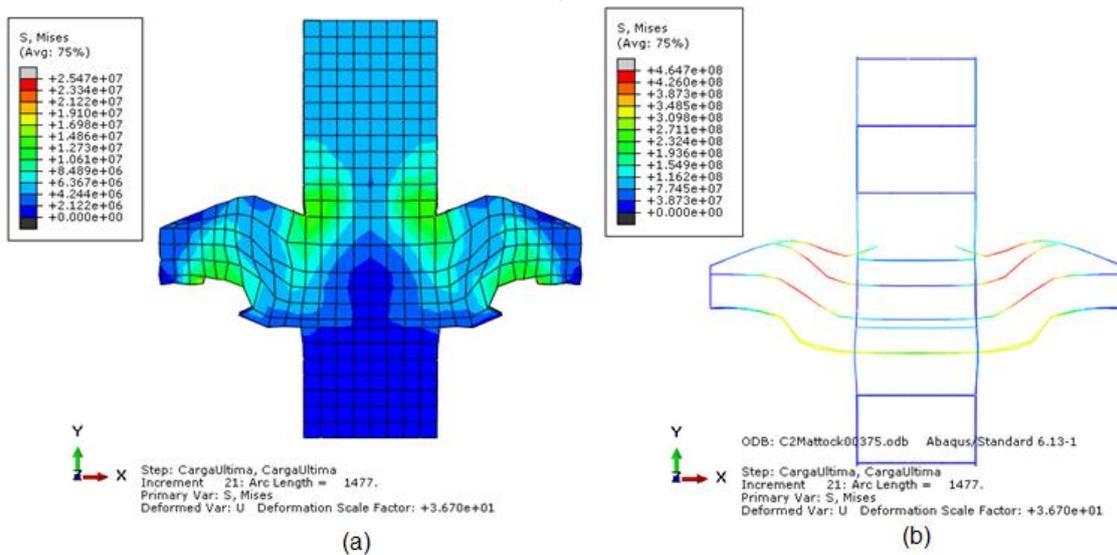


Figura 10. Concentración de tensiones para el incremento veintiuno de carga: a) hormigón;b) acero de refuerzo.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado que el Modelo de Daño Plástico es capaz de simular adecuadamente el comportamiento del hormigón en régimen no lineal, obteniendo un error en cuanto a capacidad resistente última a cortante entre simulación numérica y experimentación menor al 2%.

Se ha constatado que la consideración de una unión rígida en la interface acero-hormigón, en correspondencia con los trabajos consultados en la literatura, constituye una adecuada aproximación al fenómeno de contacto normal y tangencial con fricción. Al igual que en la interface hormigón-Platina de carga y apoyos.

De los elementos finitos disponibles en ABAQUS utilizados para discretizar los volúmenes del ensayo de ménsula de hormigón armado, los que mejor describen el comportamiento y arrojan las mejores aproximaciones son C3D8R para el hormigón y las platinas y T3D2 para el acero.

El costo computacional en cuanto a tiempo se incrementa a medida que se disminuye la densidad de malla, para el caso que nos ocupa no es muy significativo debido a que las ménsulas son de tamaño reducido. De forma general la simulación de este espécimen valida las consideraciones tomadas

en la modelación, así como la importancia de la utilización del ABAQUS, siempre con previa calibración a partir de experimentos reales.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

ABAQUS: *User's Manual*, Versión 6.13.1, Hibbitt, Karlson and Sorensen, Inc., 2013.

American Concrete Institute (ACI) Committee 318. *Building code requirements for reinforced concrete*, ACI 318-05 Commentary, ACI 318 R-05, Farmington Hills, Mich., 2005.

AZIZ, O. Q., OTHMAN, Z. S.: «Ultimate Shear Strength of Reinforced High Strength Concrete Corbels Subjected To Vertical Load», *Al-Rafidain Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-12, January, 2010.

BONILLA, J. D., LARRÚA, R., MIRAMBELL, E. Y RECAREY, C.: «Estudio de la influencia de la resistencia del hormigón en el comportamiento de conectadores mediante simulación numérica y análisis experimental», en *Ingeniería Civil*, No 147, CEDEX, pp. 57-64, Madrid, España, 2007.

BONILLA, J. D., LARRÚA, R., MIRAMBELL, E. Y RECAREY, C.: «Aplicación de la simulación numérica al estudio del comportamiento de conectadores tipo perno en estructuras mixtas de hormigón y acero», *Revista Ingeniería Civil*, No 148, CEDEX, pp. 55-68. Madrid, España, 2007b.

BONILLA, J. D., LARRÚA, R., MIRAMBELL, E. Y RECAREY, C.: «Simulación virtual del ensayo pushout para conectadores tipo perno y con sección en U en estructuras mixtas hormigón- acero», *Revista Ingeniería Civil*, No 148, CEDEX, pp. 83-93, Madrid, España, 2007c.

BONILLA, J. D.: *Estudio del comportamiento de conectores tipo perno en estructuras compuestas de hormigón y acero mediante modelación numérica*, Tesis de Doctorado. Villa Clara: UCLV, Cuba, 128 p., 2008.

CAMPIONE, G.: «Performance of Steel Fibrous Reinforced Concrete Corbels Subjected to Vertical and Horizontal Loads», *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 5, pp. 519-529. May, 2009.

- DANYING, G., JUNWEI, Z.: «Finite Element Analysis of Shear Behaviors for Steel Fiber Reinforced Concrete Corbels by ANSYS», *Second International Conference on Computer Modeling and Simulation*, pp. 303-307, 2010.
- ELLOBODY, E. Y YOUNG, B.: «Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting», *Journal of Constructional Steel Research*, 62, pp. 682-694. 2006.
- FATTUHI, N.I.: «Strength of SFRC Corbels Subjected To Vertical Load», *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, No.3, pp. 701-718, March, 1990.
- HERNÁNDEZ, H., BONILLA, J. D. RODRÍGUEZ, G.: «Estudio del comportamiento de vigas compuestas de hormigón y acero mediante simulación numérica», *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, Vol. 29, N°1, pp. 5-21, Abril, 2014.
- KRIZ, L. B., RATHS, C. H.: «Connections in Precast Concrete Structure-Strength of Corbels», *Prestress Concrete Institute PCI Journal*, V. 10, No. 1, Feb 1965, pp.16-61, 1965.
- LAM, D., ELLBODY, E.: «Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam», *Journal of Structural Engineering*, 131 (1), pp. 96-106, 2005.
- MATTOCK, A. H., CHEN, K. C., Y SOONGSWANG, K.: «The Behavior of Reinforced Concrete Corbels», *Prestress Concrete Institute PCI Journal*, pp. 52-77. March-April 1976.
- MATTOCK, A. H.: «Design proposals for reinforced concrete corbels», *Prestress Concrete Institute PCI Journal*, pp. 18-40. May-June, 1976.
- REZAEI, M., OSMAN, S. A., SHANMUGAM, N. E.: «Secondary Reinforcement in Concrete Corbel», *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 147, pp. 24-27, 2012.
- RODRÍGUEZ, G; BONILLA, J. D., HERNÁNDEZ, J. J.: «Aplicación de la simulación numérica al estudio del comportamiento de vigas de gran peralte de hormigón armado», *Revista Ingeniería Civil*, No 167, pp. 101-116. Madrid, España, 2012.
- RODRÍGUEZ, G.: «Estudio del comportamiento de vigas de gran peralte de hormigón armado mediante modelación numérica», Tesis de Maestría. Villa Clara: UCLV Cuba, 129 p., 2013.

SÁNCHEZ, E.: «Estudio preliminar del comportamiento de vigas continuas de gran peralte de hormigón armado mediante modelación numérica», Tesis de Grado en opción al título de Ingeniería Civil. Ciego de Ávila: UNICA, Cuba, pp. 103, 2014.

YONG, Y-K., AND BALAGURU, P.: «Behavior of Reinforced High-Strength-Concrete Corbels», *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.120, No.4, pp.1182-1201. April, 1994.