

Estudio de la influencia de la resistencia del hormigón en el comportamiento de conectadores mediante simulación numérica y análisis experimental

JORGE DOUGLAS BONILLA ROCHA (*), RAFAEL LARRÚA QUEVEDO (**),
ENRIQUE MIRAMBELL ARRIZABALAGA (***) y CARLOS ALEXANDER RECAREY MORFA (****)

RESUMEN En el presente trabajo se aborda la influencia de la resistencia a la compresión del hormigón en el comportamiento de conectadores tipo perno en estructuras mixtas hormigón – acero sometidas a flexión bajo carga estática. La investigación se desarrolla a partir de la simulación numérica del ensayo *push out* en sección viga-losa maciza de hormigón. Se considera la no linealidad de los materiales, adoptando en primer lugar un modelo plástico perfecto para ambos (acero y hormigón) y en segundo lugar un modelo de daño plástico para el hormigón. La modelación numérica del ensayo experimental de *push out* se ejecuta mediante el empleo del código ABAQUS. Se realizan recomendaciones metodológicas acerca de cómo tratar desde el punto de vista de modelación la interacción perno-hormigón. Se observa muy buena correspondencia de los resultados obtenidos por la vía numérica con las observaciones experimentales.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF THE CONCRETE ON THE BEHAVIOR OF STUD SHEAR CONNECTORS BY USING NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL TESTING

ABSTRACT *In this work the influence of the compressive strength of the concrete on the behavior of stud shear connectors of composite structures under static load is studied. The investigation developed starts from the numerical simulation of the push out test. The material nonlinearity is considered, firstly adopting a perfect plastic model for both materials – concrete and steel – and secondly adopting a damage plasticity model for concrete. In order to the numerically simulate the push out test the code ABAQUS (2003) is used. The results derived from the numerical model are in good agreement with the experimental results. Desing recommendations about the interaction between the stud shear connector and concrete are pointed out.*

Palabras clave: Estructuras mixtas, Conector, Comportamiento estructural, Simulación numérica, Método de elementos finitos (MEF), Modelación.

1. INTRODUCCIÓN

La modelación del comportamiento de las estructuras mixtas en base a métodos numéricos, como método de elementos finitos (MEF), constituye una herramienta muy útil de investigación en el campo de la ingeniería. Son innumerables las ocasiones en que no es posible abordar un problema de ingeniería mediante los métodos clásicos de análisis, siendo

necesario recurrir a métodos numéricos. La implementación computacional de estos métodos permite desarrollar potentes herramientas de cálculo, las cuales posibilitan la simulación virtual de fenómenos y procesos. Concretamente en este trabajo se estudia mediante simulación del ensayo *push out* el comportamiento de conectadores tipo perno en estructuras mixtas de hormigón y acero bajo carga estática. Dentro de esta temática, se destacan los trabajos de **Lam et al (2005)** y **Recarey et al (2005)**, los cuales han sido tomados como referencia.

En el comportamiento de la conexión influyen diversos factores, pudiendo citar, como uno de los relevantes, la resistencia del hormigón a compresión, la cual interviene de manera directa en la capacidad portante de la conexión. En este trabajo se estudia la influencia de este parámetro a través de un enfoque numérico, combinado con resultados experimentales como vía de calibración y validación.

Para la modelación del ensayo se emplea el código multipropósito ABAQUS/CAE (Versión 6.4-1, 2003) que se basa en el método de elementos finitos. Para el análisis del com-

(*) MSc. Ing. Profesor e Investigador, Universidad de Ciego de Avila (UNICA). Carretera a Morón km 9,5, Ciego de Avila, Cuba.

(**) Dr. Ing. Profesor Titular. Grupo de Estructuras de la Facultad de Construcciones. Universidad de Camagüey, Cuba.

(***) Dr. Ing. Catedrático. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña.

(****) Dr. Ing. Investigador Titular. Centro Int. Métodos Computacionales y Numéricos en la Ingeniería, CIMCNI. Aula CIMNE en la UCLV, Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba.

Especimen	Dimensiones del perno (mm)	Resistencia del hormigón a compresión (MPa)	Carga última en el ensayo de push out (kN)
P-1	19 x 100	20	143.2
P-2	19 x 100	30	186.0
P-3	19 x 100	35	204.0

TABLA 1. Resultados de carga última de los ensayos experimentales de push out (Lam et al, 2005)

portamiento del material en el rango no lineal se utiliza para el acero un modelo plástico perfecto. Para el hormigón se emplea indistintamente un modelo plástico perfecto y un modelo de daño plástico (*Concrete Damage Plasticity*). Se obtienen las curvas de comportamiento carga vs desplazamiento utilizando ambos modelos del material.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS ESPÉCIMENES

En este trabajo se realiza la simulación virtual de tres ensayos *push out*, donde solamente varía la resistencia del hormigón, manteniendo constante el resto de las propiedades físico-mecánicas y geométricas de la probeta. Los resultados de los ensayos han sido extraídos de los trabajos realizados por **Lam et al (2005)**. (ver tabla 1).

La geometría detallada del espécimen se puede ver en la figura 1 (epígrafe 2) del artículo titulado “*Aplicación de la simulación numérica al estudio del comportamiento de conectadores tipo perno en estructuras mixtas de hormigón y acero*”, correspondiente al presente volumen de la revista Ingeniería Civil. Allí mismo se brinda el resto de las propiedades físico-mecánicas de los cuerpos que componen la probeta.

3. CRITERIOS GENERALES DE LA MODELACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, se ha utilizado el código **ABAQUS** como herramienta para la simulación virtual del ensayo de conectadores, respetando de la manera más fiel posible cada una de las partes o volúmenes que componen la probeta: losas de hormigón, perfil I y conectadores.

Los aspectos relacionados con la definición de las condiciones de frontera o borde de los cuerpos, selección del tipo de elemento finito, densidad de malla y modelos de comportamiento de los materiales en la etapa no lineal son tratados en detalles en el artículo ya antes citado, titulado “*Aplicación de la simulación numérica al estudio del comportamiento de conectadores tipo perno en estructuras mixtas de hormigón y acero*”, es por ello que no se explican nuevamente.

4. SUPERFICIE DE CONTACTO EN LA INTERFASE PERNO-HORMIGÓN

En la interfase perno-hormigón se desarrollan considerables esfuerzos de rozamiento en algunas regiones del contacto dado las elevadas tensiones normales, esto unido posibles enlaces electroquímicos provoca bajo la acción de las cargas grandes tensiones tangenciales en la superficie de los cuerpos en contacto.

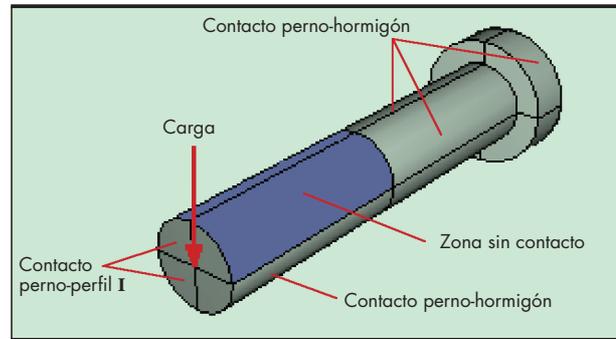


FIGURA 1. Superficies de contacto del perno con el hormigón.

Es meritorio destacar que en el modelo que se estudia intervienen varias no linealidades, o sea, la geométrica, la no linealidad del material y la que implica el contacto entre los cuerpos. Desde el punto de vista de convergencia numérica se presentan serias dificultades frente a un problema con todos estos fenómenos a la vez. La no linealidad del contacto es la más importante de todas. Por ello es recomendable obviar en la medida de lo posible una forma de contacto que involucre tensiones normales y tangenciales con fricción, a menos que exista una influencia decisiva en el comportamiento de la estructura. En este caso no es factible obviar el rozamiento dada su influencia en el estado tensional de la interfase.

Según observaciones realizadas por **Jayas y Hosain (1987)**, así como por **Kitoh y Sonoda (1990)**, se plantea que existe una pérdida del contacto debido a la separación que se produce detrás del perno en la dirección opuesta a la aplicación de la carga, hecho éste que ha sido comprobado previamente en la experimentación y que también se constata a partir de la simulación. (ver figura 1).

Teniendo en cuenta las limitaciones antes citadas y las observaciones experimentales se ha considerado un contacto rígido entre ambos cuerpos, es decir, como si estuvieran fundidas físicamente ambas superficies, en lugar de generar contacto normal y tangencial con fricción. En la zona semicilíndrica opuesta al sentido de aplicación de la carga solo una parte de la superficie del vástago es conectada a los nodos de la superficie del hormigón (ver figura 1). La región sin contacto tiene una longitud variable, pues, como se verá más adelante, la deformación del conectador depende de la propia resistencia del hormigón. Se realizan análisis preliminares para observar el estado tenso-deformacional de la conexión y así liberar aquellos nodos que trabajan a tracción e ir disminuyendo la superficie de contacto perno-hormigón.

Para la probeta P-1, después de realizar varios análisis preliminares, se ha liberado toda la parte posterior del perno (semicircunferencia) hasta un 50 % de su longitud. Seguidamente se hace un estudio para corroborar la validez de tal hipótesis de partida para el caso de la probeta ensayada P-1. Para esto se han realizado varios análisis del modelo para diferentes longitudes de contacto. Dichos análisis han sido realizados previamente considerando un modelo de comportamiento bilineal para el hormigón.

En la figura 2 se muestra la relación entre la capacidad de carga y el porcentaje del vástago libre de contacto con el hormigón. Se ha realizado el estudio considerando que no hay contacto en un rango de 20-60 % de la longitud del vástago cercana a la base. Del mismo modo, en la figura 3 se ha representado la relación entre el desplazamiento de la probeta y dicho porcentaje.

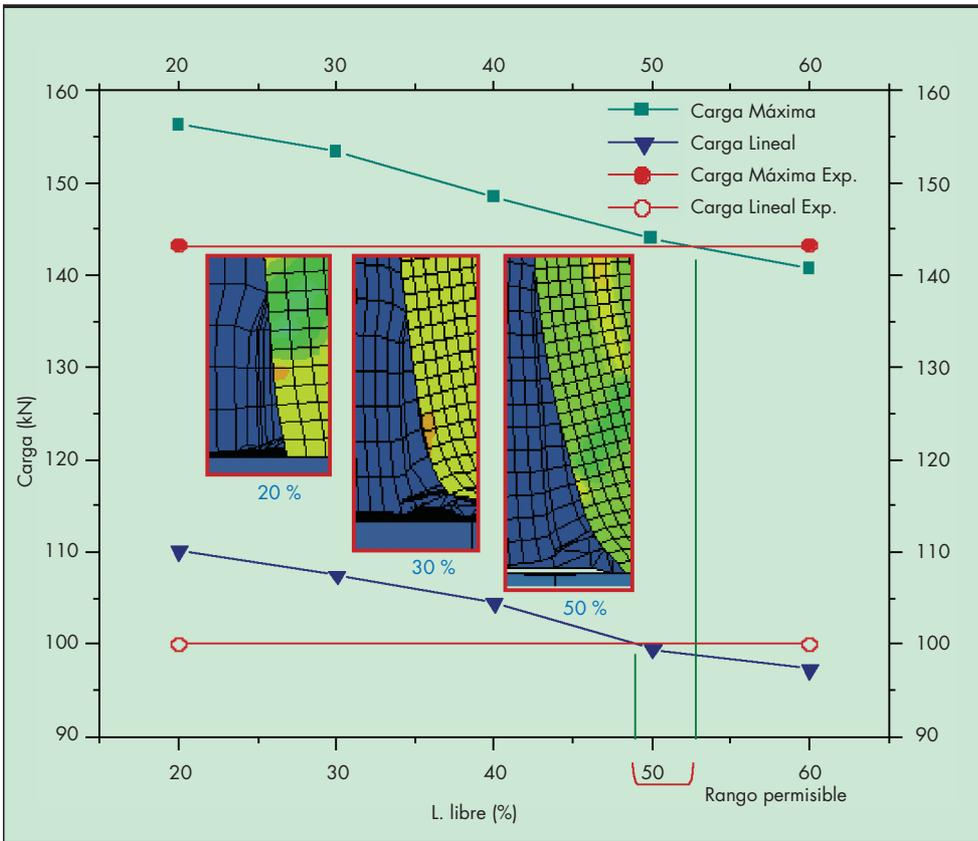


FIGURA 2. Relación carga vs contacto perno - hormigón.

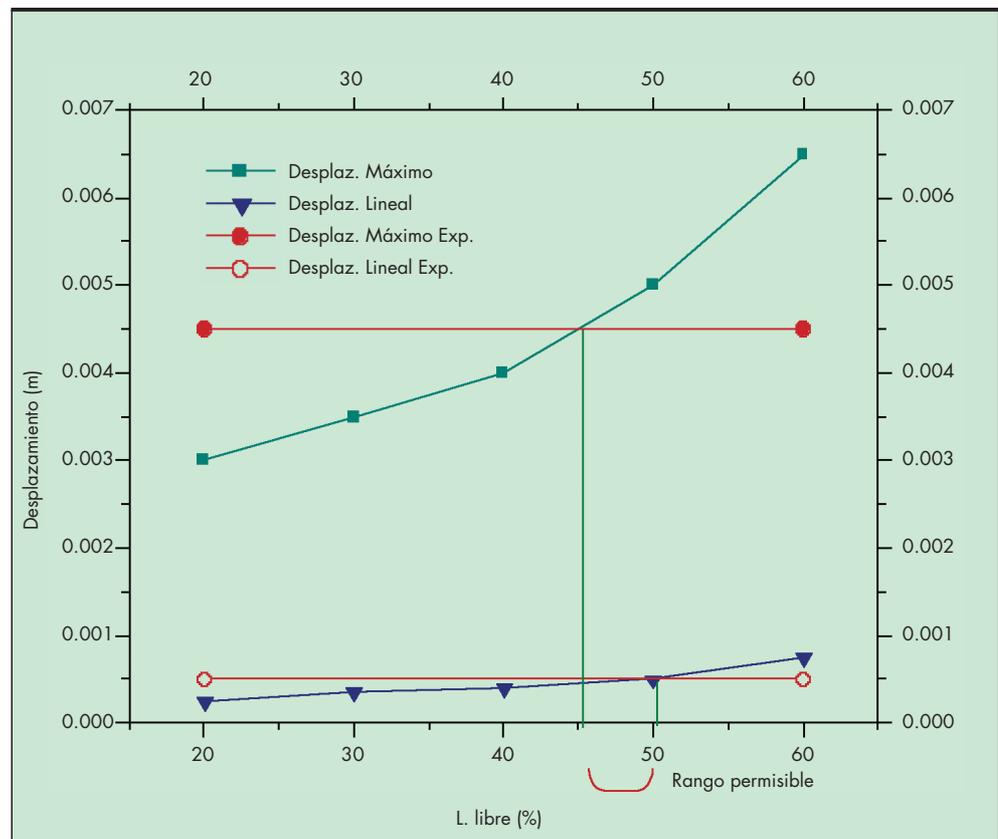


FIGURA 3. Relación desplazamiento vs contacto perno-hormigón.
 Nota: Los términos carga lineal y desplazamiento lineal se refieren al punto en que la curva de comportamiento carga vs desplazamiento de la probeta deja de tener un comportamiento lineal.

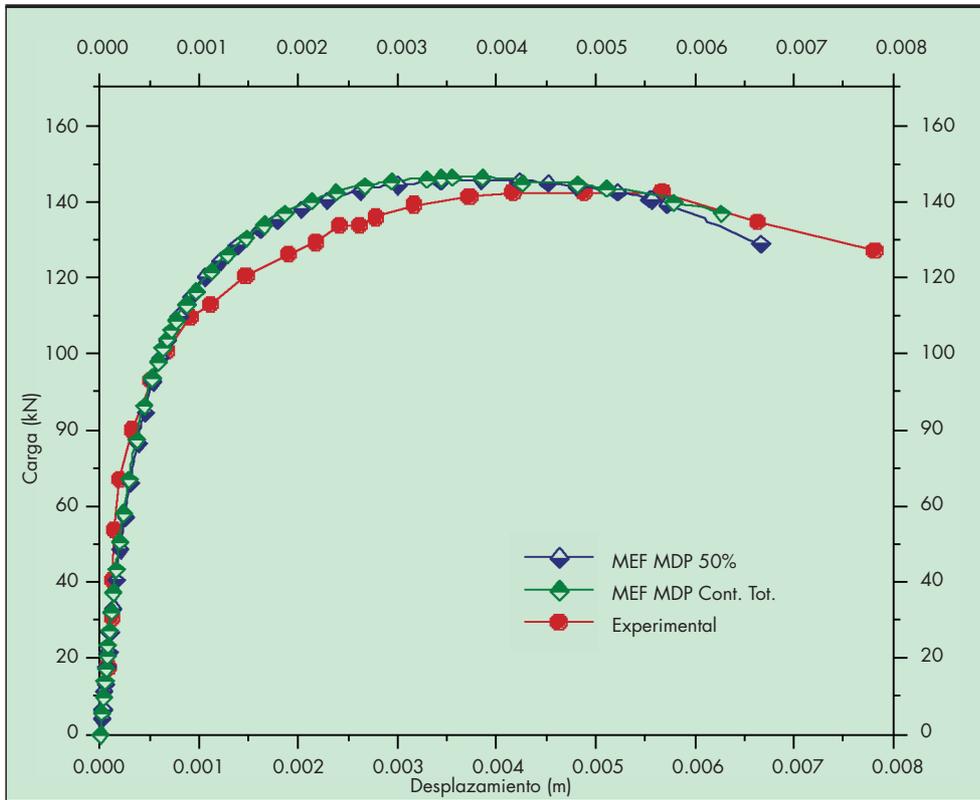


FIGURA 4. Curvas carga-desplazamiento considerando modelo de daño plástico para el hormigón, con contacto total (MEF MDP contacto total) y con contacto parcial (MEF MDP 50% contacto).

Se observa que para esta probeta en concreto, con sus características físico mecánicas el porcentaje del 50 % se encuentra en un rango permisible. Se han analizado ambas variables de respuesta, es decir carga y desplazamiento, aunque se ha prestado más atención a la carga, pues el desplazamiento obtenido experimentalmente, en ocasiones, es inconsistente [Johnson et al, 1998].

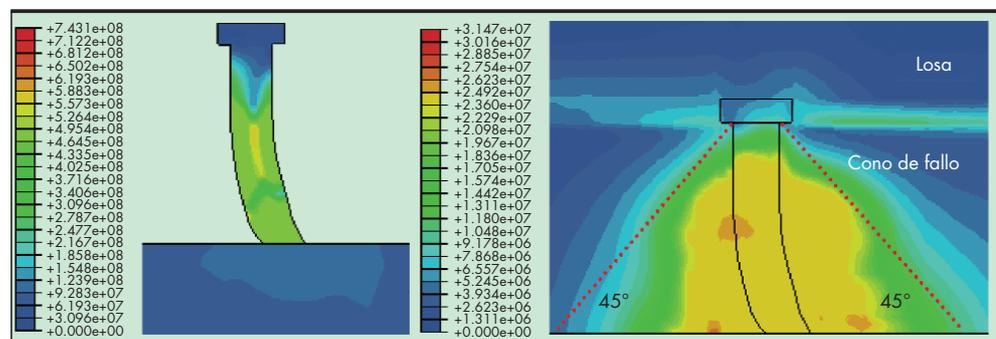
Se realiza un análisis similar cuando se emplea el modelo de daño plástico para el hormigón. En este caso solamente se han comparado los resultados obtenidos considerando en un primer caso contacto total de la superficie perno-hormigón y en un segundo caso contacto parcial, liberando el 50 % de la superficie del vástago. En la figura 4 se muestran las curvas de comportamiento obtenidas para ambos casos. Puede apreciarse que no existen diferencias significativas para ambas consideraciones, pues prácticamente existe coincidencia total en ambas soluciones numéricas.

5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN VIRTUAL

Se ha observado en los estudios experimentales de Lam et al (2005) tres formas de fallo presentes en la conexión, las cuales Ollgaard et al (1971) y MacMacking et al (1973) ya habían caracterizado para el caso de sección mixta en presencia de losa rectangular:

- Fallo del hormigón. Desprendimiento del hormigón que circunda al perno en forma cónica. No se observa falla en el perno.
- Fallo del conector a cortante. Se plastifica completamente el perno en su base, sin observarse fallo en el hormigón.
- Fallo simultáneo en el perno y el hormigón, ambos aportan la máxima capacidad.

FIGURA 5. Estado tensional de la conexión P-1, previo a la rotura.



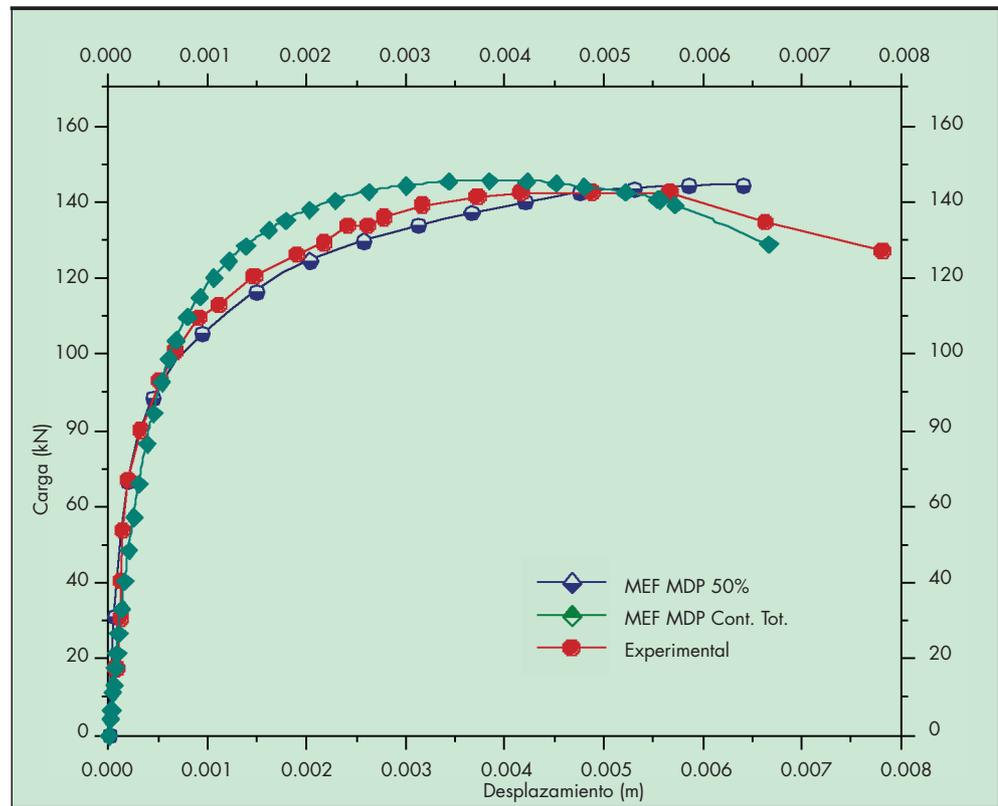


FIGURA 6. Curvas de comportamiento de la probeta P-1.

5.1. PROBETA P-1

Como se puede apreciar en la tabla 1, la resistencia a la compresión del hormigón en esta probeta es relativamente baja, produciéndose el fallo por el desprendimiento del hormigón que rodea al perno en forma cónica.

Como resultado del análisis numérico de la probeta **P-1** en la figura 5 se observa a escala real el estado tenso-deformacional existente en el conector y en el hormigón en momentos previos a la rotura.

En la figura 6 se muestran las curvas de comportamiento a partir de la simulación numérica de la probeta P-1 y la curva experimental. Se han designado de la siguiente manera: MEF MPP (solución numérica considerando modelo bilineal en el hormigón) y MEF MDP (solución numérica considerando modelo de daño plástico en el hormigón).

5.2. PROBETA P-2

En esta probeta el hormigón presenta una mayor resistencia a compresión que en el caso anterior. Se han mantenido constante el resto de las propiedades físicas y mecánicas de la probeta. La rotura se produce por la combinación del fallo en ambos materiales, o sea el hormigón en zonas cercanas a la base del conector y plastificación del perno en su base.

La figura 7 muestra la deformación plástica del perno en su base al aproximarse a la rotura; por otra parte, se observa que el hormigón que circunda la base del conector plástifica. Ambos aspectos corroboran lo observado en el ensayo.

La longitud del conector que se curva, cercana a la base, en este modelo es menor que para el modelo anterior (P-1), aspecto que lleva además a una mayor concentración de grandes tensiones, más alejada de la cabeza del perno. La plastificación en la base del conector para este caso es

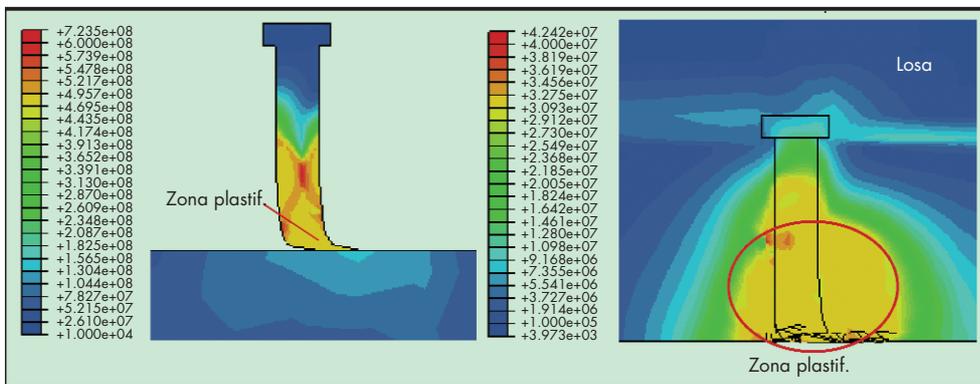


FIGURA 7. Estado tensional de la conexión P-2, previo a la rotura.

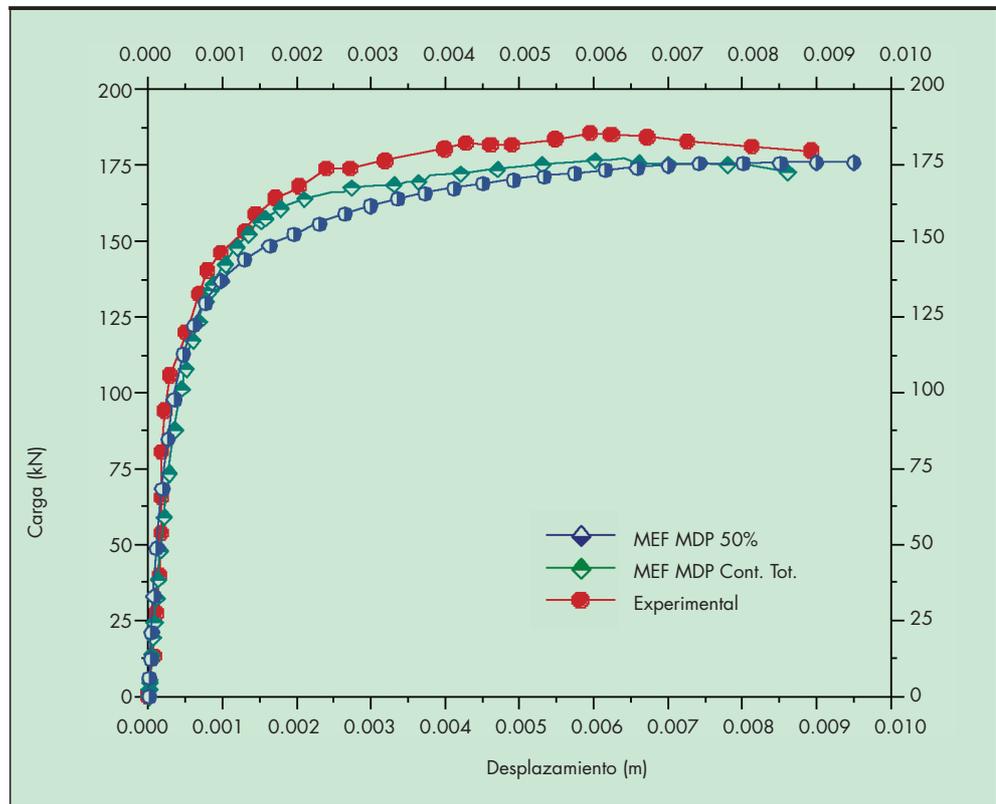


FIGURA 8. Curvas de comportamiento carga – desplazamiento de la probeta P-2.

mayor que para el modelo anterior P-1. En la figura 8 se brindan las curvas de comportamiento carga vs desplazamiento obtenidas por la vía experimental y numérica respectivamente.

En la figura 11 se pueden observar las curvas de comportamiento para la probeta P-2 a partir de la solución numérica y la obtenida experimentalmente. Al igual que para el estudio anterior, se ha considerado primero un modelo de comportamiento bilineal para ambos materiales (MEF MPP) y en segundo lugar, un modelo de daño plástico para el hormigón (MEF MDP).

5.3. PROBETA P-3

La resistencia a compresión del hormigón para esta probeta es mayor que en la probeta anterior (P-2). La rotura se pro-

duce por la combinación del fallo en ambos materiales como ocurrió en P-2, aunque se apreció una tendencia a que el fallo ocurriera primeramente en el conector por cortante.

En la figura 9 se observa cómo plastifica el perno en su base, así como el hormigón que circunda al vástago, hecho que corrobora lo observado en el experimento. La longitud del conector cercana a la base que se curva es un tanto menor que en P-2, alejándose aun más la concentración de tensiones de la cabeza del perno.

A continuación en la figura 10 se muestran las curvas de comportamiento para la probeta P-3, teniendo en cuenta las soluciones numéricas y los resultados experimentales; al igual que en los casos anteriores, se ha considerado un modelo bilineal para ambos materiales (MEF MPP) y un modelo de daño plástico para el hormigón (MEF MDP).

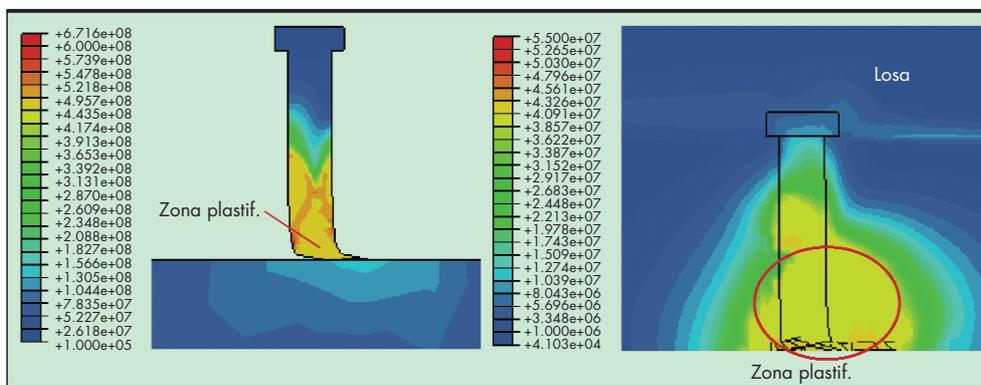


FIGURA 9. Estado tensional de la conexión P-3, previo a la rotura.

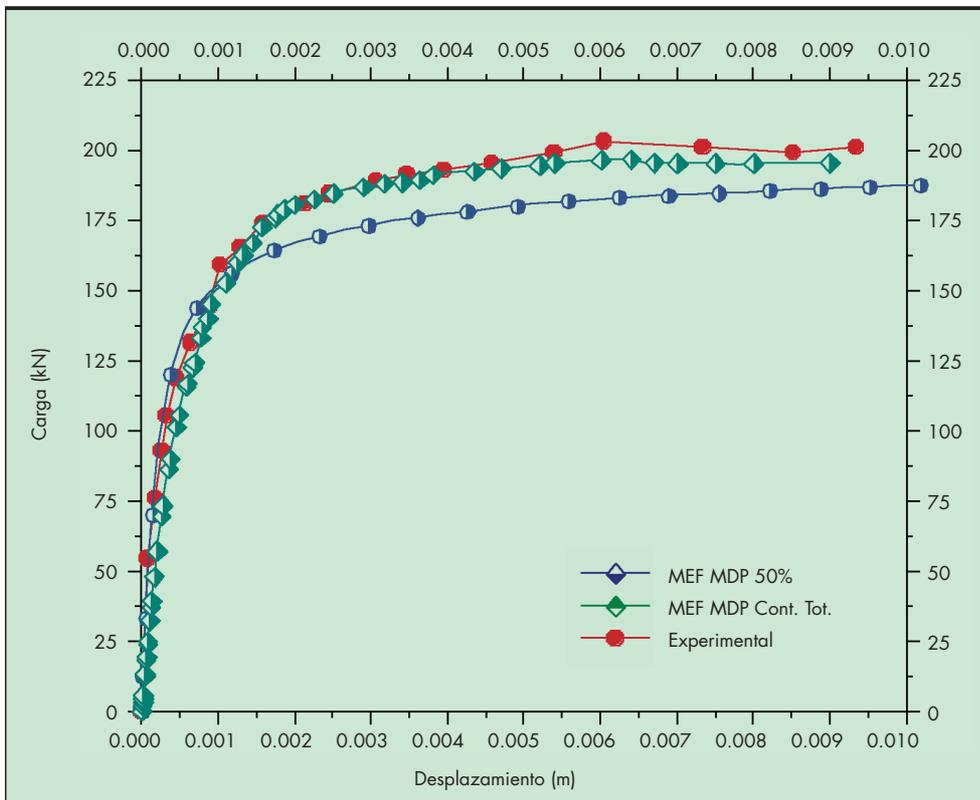


FIGURA 10. Curvas de comportamiento carga – desplazamiento de la probeta P-3.

Conviene señalar que el cono de tensiones que describe el modelo para este caso está más concentrado, presentando un menor diámetro en su base. Si se analizan los casos anteriores, se observa que a medida que ha ido aumentando la resistencia del hormigón, ha ido disminuyendo progresivamente el diámetro de la base del cono.

6. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

La figura 11 muestra el estado tenso-deformacional de los conectadores de cada probeta analizada. Es importante reiterar que en este estudio se ha variado solamente la resistencia a la compresión del hormigón, o sea 20 MPa (P-1), 30 MPa (P-2) y 35 MPa (P-3). Se observa que el estado tensional se aleja de la

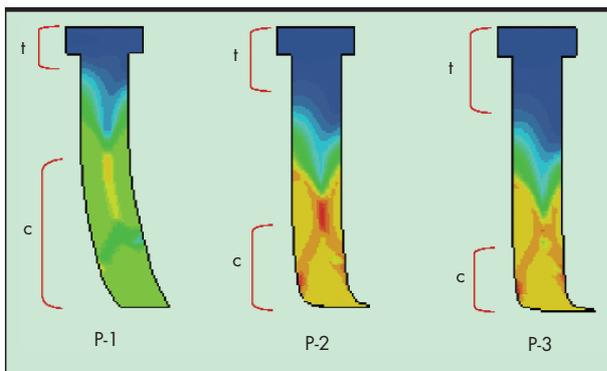


FIGURA 11. Estado tenso-deformacional del conectador, para las tres probetas analizadas.

cabeza del perno, haciéndose cada vez mayor la longitud (t) a medida que se incrementa la resistencia del hormigón. Por el contrario, la longitud (c) del vástago que se curva disminuye a medida que aumenta la resistencia del hormigón a compresión. La observación de ambos aspectos es absolutamente coherente. Ello corrobora los estudios de **Ollgaard et al (1971)**, que concluyen que el comportamiento tenso-deformacional del perno conectador depende muy directamente de la resistencia a compresión del hormigón.

En la tabla 2 se muestra, de forma comparativa, los resultados de capacidad de carga obtenidos a partir de las soluciones numéricas adoptando un modelo bilineal y un modelo de daño plástico para el hormigón, y los resultados experimentales.

En las curvas de comportamiento mostradas anteriormente se observa una gran concordancia entre los resultados experimentales y los derivados del modelo numérico. Un aspecto a destacar es que en el caso de que para ambos materiales se adopte un modelo constitutivo bilineal, no se aprecia el momento en que decae bruscamente la carga (al llegar a la capacidad máxima), hecho este que sí se puede observar en el caso en que se adopte para el hormigón un modelo constitutivo de daño plástico. Este cambio brusco de pendiente se puede ver en los casos en que el fallo se produce en el hormigón o en ambos materiales, con predominio del fallo en el hormigón. La no referencia explícita a un análisis de los resultados soportados en la determinación del movimiento vertical de la conexión en el instante próximo a la rotura de la probeta es debido a la fuerte dispersión que existe en este resultado; probetas con características prácticamente idénticas arrojan resultados experimentales del desplazamiento vertical en situación próxima a rotura con una gran variabilidad [**Johnson y Yuan, 1998**].

Especimen	Push Out (kN)	MEF MPP (kN)	MEF MDP (kN)	P.Out/MPP	P.Out/MDP
P-1	143.2	144.5	143.70	0.991	0.996
P-2	186.0	176.2	177.15	1.055	1.049
P-3	204.0	188.8	197.0	1.080	1.035

TABLA 2. Resultados numéricos y experimentales de capacidad de carga para las tres probetas.
Nota: La tabla muestra la capacidad de carga de la probeta en su conjunto. Para obtener la carga última del conector se debe dividir el valor que se ofrece entre dos.

7. CONCLUSIONES

Se ha comprobado que el empleo de contacto rígido en la interfase perno - hormigón constituye una aproximación acertada al comportamiento que incluye contacto normal y tangencial con fricción.

Los resultados derivados del modelo numérico cuando se adopta un modelo bilineal dependen de la selección de una superficie de contacto óptima, no siendo así en los casos en que se adopta un modelo de daño plástico para el hormigón, en donde las diferencias entre contacto parcial y total son muy poco significativas.

Al observar las curvas de comportamiento obtenidas numérica y experimentalmente se puede concluir que existe una gran concordancia entre los resultados, no existiendo diferencias significativas. Para la capacidad de carga, cuando se adopta un modelo de daño plástico para el hormigón, se obtuvieron diferencias inferiores al 5 % con relación a la experimentación, permitiendo validar de esta manera la aplicación del método de elementos finitos en el estudio del comportamiento de conectadores.

Cuando se emplea un modelo bilineal para el hormigón se aprecia una mayor desviación en los resultados de las probetas P-2 y P-3, con relación al comportamiento experimental, aunque en un rango que pudiera ser permisible. Este hecho pudiera posibilitar la utilización de un modelo bilineal en el hormigón en aquellos casos en que existan problemas de convergencia numérica al emplear un modelo de daño plástico para el hormigón.

Según los resultados obtenidos derivados de los modelos numéricos se ha podido comprobar que en la zona de los conectadores más próxima a la base del vástago es donde se concentran las mayores tensiones. Este fenómeno se acentúa más a medida que aumenta la resistencia del hormigón a compresión.

Se corrobora, a partir de los diferentes resultados obtenidos, lo planteado por **Ollgaard et al (1971)**, los cuales, después de realizar numerosos estudios experimentales, concluyeron que la resistencia de la conexión decrece cuando disminuye la resistencia del hormigón a compresión.

8. BIBLIOGRAFÍA

ABAQUS. (2003): User's Manual, Ver. 6.4-1, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.

Cobelo, W.; Recarey, C. y Castañeda, A. (2004): Análisis de asentamiento de Láminas como estructura de Cimentación. Revista Ingeniería Civil, CEDEX, No 135, p 115-122.

Jayas, B. S. y Hosain, M. U. (1987): Behavior of Headed Studs in Composite Beams: Push-out Test. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol 15, No 2, p 240-253.

Johnson, R. P. y Yuan, H. (1998): Existing Rules and New Tests for Stud Shear Connectors in Troughs of Profiled Sheeting. Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 128, p 244-251.

Kitoh, H. y Sonoda, K. (1990): Forces on the Studs in a Steel Plate and Concrete Slab. International Association for Bridge and Structural Engineering (LABSE) Symposium, Brussels, p 185-190.

Lam, D. y El-Lobody, E. (2005): Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam, Journal of Structural Engineering, Vol 131, No 1, p 96-107.

Oller, S. (1996): Modelos constitutivos. Curso sobre métodos numéricos para el cálculo y diseño en ingeniería. Universidad Politécnica de Barcelona, España.

Oller, S. (2001): Fractura mecánica. Un enfoque global. CIMNE, Primera edición, Barcelona, España, 307 p.

Ollgaard, J. G., Slutter, R. G. y Fisher, J. W. (1971): Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete. Engineering Journal. AISC, Vol 8, No 2, p 55-64.

Oñate, E. (1995): Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. CIMNE, Segunda edición, Barcelona, España, 830 p.

Rambo-Roddenberry, M. D. (2002): Behavior and Strength of Welded Stud Shear Connectors. PhD. Thesis University of Blacksburg, Virginia, EE.UU, 245 p.

Recarey, C. A.; Mirambell, E.; Quevedo, G. y Santa Eugenia, J. (2005): Modelación estocástica de ensayos virtuales de conexiones de secciones mixtas hormigón-acero, Revista Ingeniería Civil, CEDEX, No 139, 2005 p 37-48.

Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. (2000): The Finite Element Method, Butterworth-Heinemann, Fifth edition, Barcelona, Spain. 705 p.