

**Título: Simulación virtual del ensayo *push out* para conectadores tipo perno y con sección en U en estructuras mixtas hormigón-acero.**

**Autores:** MSc. Ing. Jorge Douglas Bonilla Rocha (\*)  
Dr. Ing. Rafael Larrúa Quevedo (\*\*)  
Dr. Ing. Enrique Mirambell Arrizabalaga (\*\*\*)  
Dr. Ing. Carlos Alexander Recarey Morfa (\*\*\*\*)

(\*) Profesor, Universidad de Ciego de Avila (UNICA). Carretera a Morón km 9 ½, Ciego de Avila, Cuba.

**E-mail:** [jorgedbr@informatica.unica.cu](mailto:jorgedbr@informatica.unica.cu)

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

**E-mail:** [rafael.larrua@reduc.edu.cu](mailto:rafael.larrua@reduc.edu.cu)

(\*\*\*) Catedrático. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

**Email:** [enrique.mirambell@upc.edu](mailto:enrique.mirambell@upc.edu)

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

**E-mail:** [recarey@fc.uclv.edu.cu](mailto:recarey@fc.uclv.edu.cu), [recarey@cimne.upc.edu](mailto:recarey@cimne.upc.edu)

## **Resumen**

Se estudia el comportamiento de conectadores tipo perno y con sección en U en estructuras mixtas de hormigón y acero, mediante la simulación virtual del ensayo *push out* en sección viga y losa maciza de hormigón, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal de los materiales y la no linealidad de las condiciones de contorno e interfase. Se considera un modelo plástico perfecto para ambos materiales (acero y hormigón), así como un modelo de daño plástico en el hormigón. La simulación virtual se realiza mediante el programa computacional **ABAQUS (2003)**, donde se plantean los procedimientos metodológicos para la construcción del modelo. A partir del procesamiento numérico se obtienen resultados que están en concordancia con los obtenidos experimentalmente, apreciándose el estado tenso-deformacional de los materiales, así como la evolución del daño en el entorno de la conexión.

**Palabras claves:** estructuras mixtas, conector, comportamiento estructural, simulación numérica, método de elementos finitos (MEF), modelación.

## 1. Introducción

Recurrir a la simulación numérica de ensayos reales para estudiar fenómenos físicos constituye una tendencia habitual por las ventajas que comporta en cuanto a ahorro de recursos materiales. La experimentación supone, en no pocas ocasiones, un sofisticado soporte tecnológico y el encarecimiento de las investigaciones.

En este trabajo se estudia el comportamiento de conectadores tipo en U laminado en caliente y tipo perno, a través de la simulación virtual del ensayo *push out*, constituyendo dicho ensayo la vía experimental utilizada de manera más generalizada para tal propósito, desde los inicios de las estructuras mixtas como tipología estructural [Davies, 1967].

El conectador tipo en U, no tan difundido como el perno, es tratado en este documento con mayor grado de detalle observándose la evolución del comportamiento tenso-deformacional desde bajos niveles de carga hasta la situación próxima al fallo. Esta forma de conexión constituye una solución alternativa que puede ser usada en secciones compuestas por viga y losa rectangular de hormigón. Ello no ocurre así en el caso de sección compuesta por viga y losa en presencia de chapa, donde la colocación de este elemento en la nervadura es dificultosa por su forma en la base.

Sobre la simulación virtual del ensayo de conectadores se destacan los trabajos de Lam et al (2005) para perno, del cual se han tomado criterios acerca de la modelación del comportamiento de los materiales y la geometría. Merecen destacarse también los trabajos de Recarey et al (2005) y de Bonilla et al (2007).

La modelación numérica se lleva a cabo mediante el código multipropósito ABAQUS, que se basa en el método de elementos finitos.

Al estudiar el conectador tipo en U, se ha adoptado para la modelación del comportamiento de los materiales en régimen no lineal, un modelo plástico perfecto para ambos (acero y hormigón). En el modelo que estudia el conectador tipo perno se emplea, en un primer caso, un comportamiento plástico perfecto para ambos materiales y, en un segundo caso, se adopta para el hormigón un modelo de daño plástico.

En el presente trabajo se aprovecha el carácter simétrico de las probetas en cuanto a geometría, cargas y propiedades físico-mecánico de los cuerpos que integran el modelo, con el objetivo de reducir el tiempo de computación.

Después de obtenidos los resultados por la vía numérica se observa muy buena correspondencia con los resultados experimentales, hecho que evidencia la validez de los modelos, así como del método de los elementos finitos para estudiar el comportamiento de conectadores de estructuras mixtas de hormigón y acero.

## 2. Descripción del espécimen

En este trabajo se distinguen dos especímenes; uno de ellos considera un conector tipo sección en U y el otro un conector tipo perno:

### a) Probeta de Larrúa (1992)

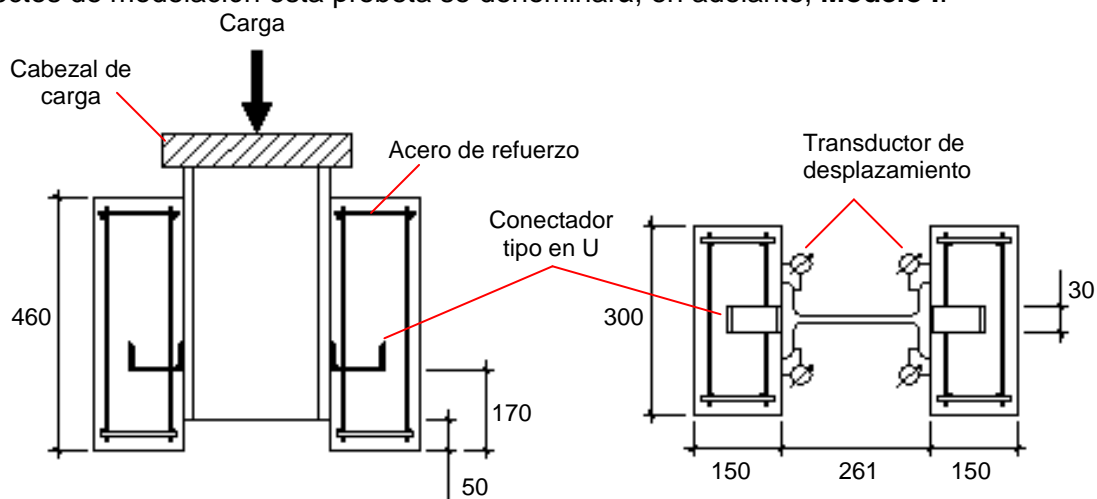
Está constituida por un perfil **I 26b2** del surtido soviético **GOST 26020-83**, dos conectores del tipo **UE** laminado en caliente, dispuestos uno a cada lado del perfil, también del surtido soviético **GOST 8240-72** con un límite elástico y una tensión de rotura de  $f_y = 334.76 MPa$  y  $f_u = 531.3 MPa$  respectivamente. Los conectores son segmentos de perfil de 30 mm de longitud.

Para el armado de las losas de hormigón se utilizan barras de acero corrugado de 10 mm de diámetro y de límite elástico y tensión de rotura de  $f_y = 375.13 MPa$  y  $f_u = 593.36 MPa$  respectivamente.

Se disponen a ambos lados del perfil, unidas mediante los conectores, dos losas de hormigón con resistencia a compresión  $f_c = 20 MPa$  y de dimensiones 460 x 300 x 150 mm (largo x ancho x espesor) (ver figura 1). Los valores de límite elástico y de la tensión de rotura que se brindan, han sido obtenidos a partir de ensayos realizados a muestras tomadas de los propios materiales con los que se construyeron los especímenes [Larrúa, 1992].

Se colocó una película de grasa en la superficie exterior del ala del perfil **I**, para impedir la fricción en la interfase losa-perfil.

A efectos de modelación esta probeta se denominará, en adelante, **Modelo I**.



**Figura 1** - Esquema de la probeta con conector tipo sección en U (cotas en mm)

### b) Probeta de Chapman y Balakrishnan (1964)

Está formada por un perfil metálico I 12" x 6" x 44 lb y losas de hormigón a ambos lados de 305 x 457 x 150 mm (largo x ancho x espesor), unidas a las alas mediante dos conectores tipo perno de 19 mm de diámetro, que se distribuyen en pares, dos a cada lado del perfil, espaciados entre sí a 64 mm, medido al eje de cada perno, con  $f_{yc} = 522 \text{ MPa}$  y  $E_s = 210000 \text{ MPa}$ . La resistencia del hormigón a compresión es de  $f_c = 35.5 \text{ MPa}$ . Los dispositivos para medir los desplazamientos, se ubican en zonas cercanas al lugar en que se encuentra cada uno de los conectores.

Este espécimen, a efectos de modelación, en lo adelante, se denominará **Modelo II**.

La carga se aplica en la zona central del alma del perfil (sobre placa rígida), colocado en posición vertical. En la interfase perfil metálico-losa de hormigón se coloca una película de grasa para propiciar el deslizamiento entre los dos materiales. (ver figura 2)

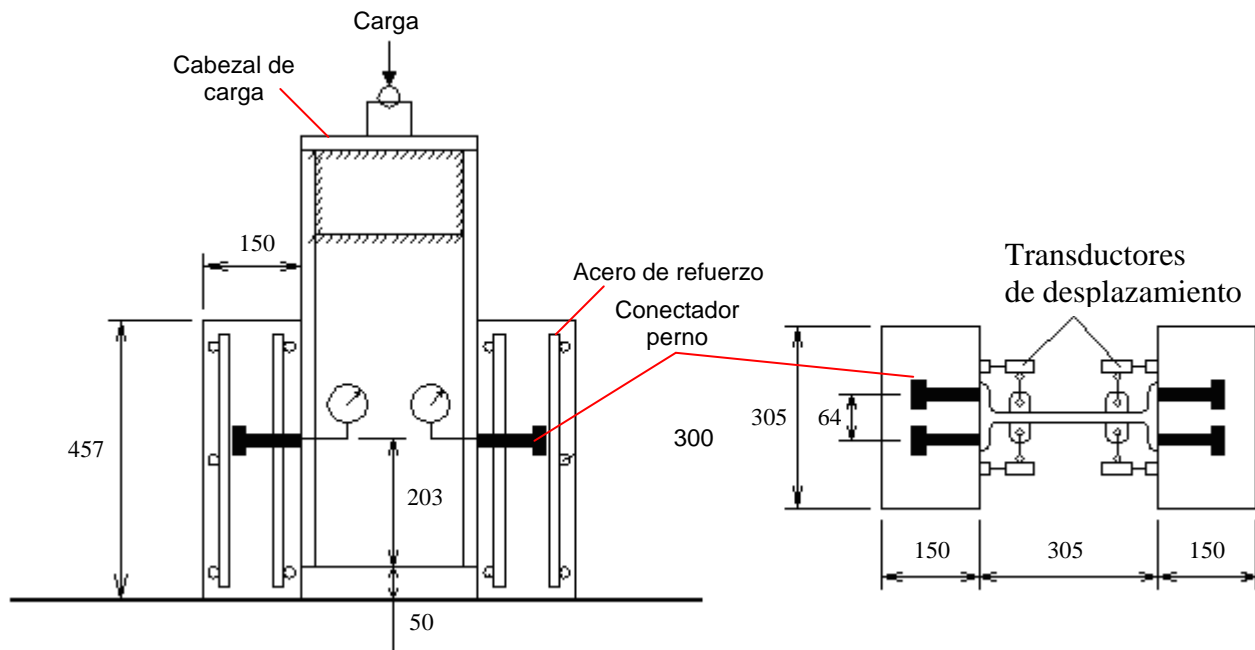


Figura 2 – Esquema de la probeta con conectores tipo perno (cotas en mm)

### 3. Aspectos relacionados con la modelación virtual del ensayo *push out*

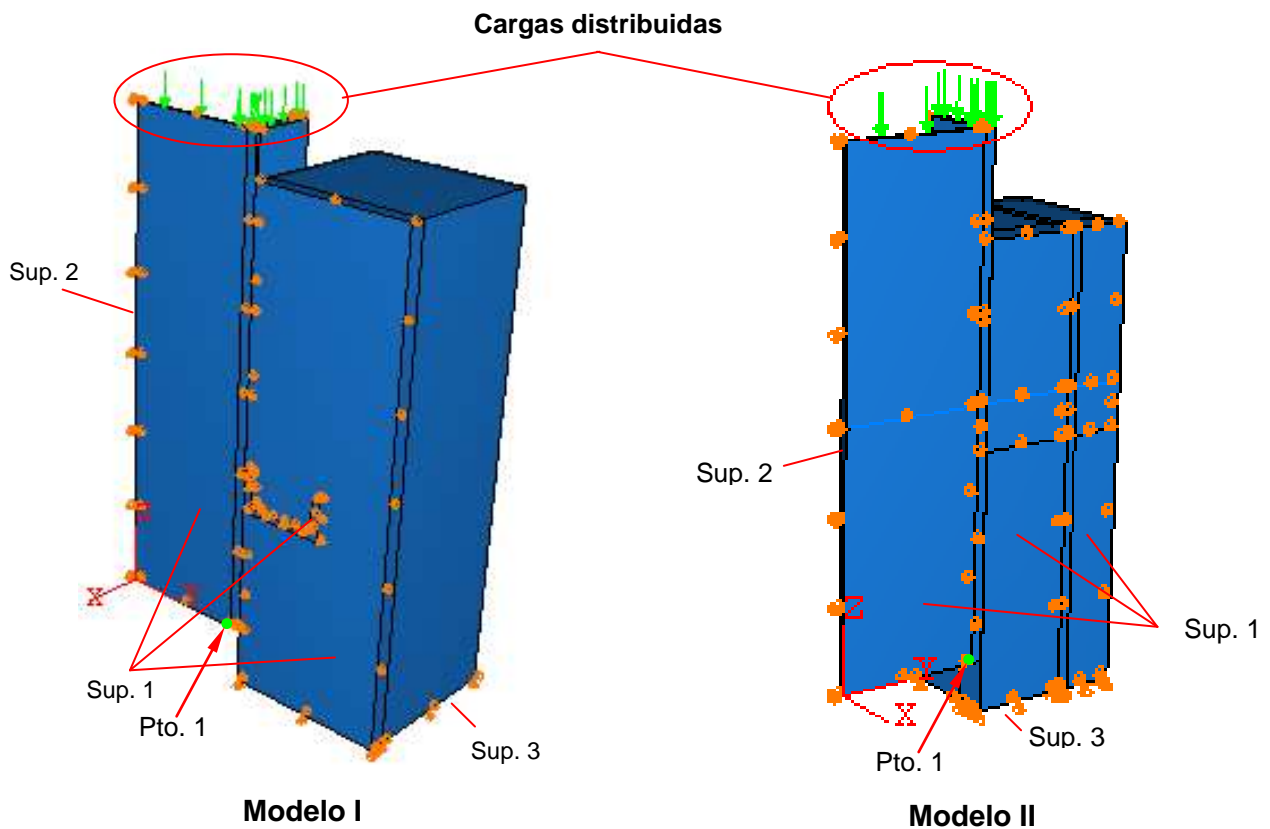
#### 3.1 Modelación de la geometría y condiciones de frontera

Para la modelación geométrica de las probetas se han adoptado modelos simplificados aprovechando la simetría de la geometría de las mismas y de la aplicación de las cargas, estando ello de acuerdo con los trabajos de Lam et al (2005).

Cada una de las partes que componen el modelo han sido representadas tridimensionalmente, aprovechando las facilidades que brinda **ABAQUS/CAE** y respetando cada parte o volumen que componen cada espécimen:

- Conectores sección en U laminado en caliente en el **Modelo I** y perno en el **Modelo II**.
- Losas rectangulares de hormigón.
- Perfil I laminado en caliente.

Cada parte integrante de la probeta es construida en el módulo partes de **ABAQUS/CAE** y posteriormente se ensamblan en el módulo de ensamblaje hasta conformar el espécimen. En la figura 3 se muestra una representación tridimensional de los modelos ya ensamblados, donde se incluyen además las condiciones de frontera o borde de cada elemento.



**Figura 3 – Modelos tridimensionales simplificados**

**a) Conector tipo sección en U:** Es el elemento encargado de transmitir los esfuerzos del perfil a la masa de hormigón. El conector en este caso presenta dos superficies de interacción, o sea, la interfase conector - perfil y conector - hormigón. La interfase conector-perfil es una unión rígida, pues ésta se logra en la práctica mediante un cordón de soldadura corrido en todo el perímetro del contacto. Por otra parte, en la interfase conector-hormigón no existe una continuidad estructural. En esta zona lo más recomendable sería generar un contacto que

involucre contacto normal y tangencial con fricción entre las dos superficies, dados los elevados esfuerzos normales que se originan en dicha interfase, sobre todo en las zonas próximas a la base del conector. Sucede que no es factible desde el punto de vista de convergencia numérica considerar una interfase con contacto normal y fricción, sobre todo en un problema como éste donde están presentes las no linealidades del material, de la geometría y del contacto. Por ello se ha considerado un contacto rígido en la interfase conector-hormigón, teniendo en cuenta como se ha planteado los elevados esfuerzos normales que se originan en dicha interfase, además de enlaces electroquímicos en dicha zona. Todos estos aspectos redundan en una muy significativa fuerza de rozamiento, la cual provocaría elevadas tensiones tangenciales. **Lam et al (2005)** y **Bonilla et al (2007)** en sus trabajos utilizan un contacto rígido en la interfase perno-hormigón, desconectando aquellos nodos que, a través de la experimentación, se ha comprobado que no participan en la unión. En este sentido se han liberado aquellos nodos de zonas en las que se sabe, a partir de análisis preliminares, que se pierde el contacto entre los dos cuerpos y por tanto su contribución es nula. Ello ocurre principalmente en zonas próximas a la base del conector y en sentido opuesto a la aplicación de la carga. **Jayas y Hosain (1987)**, así como **Kitoh y Sonoda (1990)**, tras observaciones experimentales, señalan que la separación ocurre entre el conector y el hormigón, incluso para valores de carga bajos.

Al estar en presencia de una simplificación de la geometría de la probeta y para estar en correspondencia con la continuidad del elemento y su comportamiento tenso-deformacional, en la superficie 1, perteneciente al conector tipo en U se ha restringido el desplazamiento en el eje X.

**b) Conector tipo perno:** Desde el punto de vista estructural el perno tiene la misma función que el conector con sección en U, encargándose de transmitir los esfuerzos entre el perfil y el hormigón. De igual manera que para el caso anterior, la interfase en este caso es tratada como rígida, desconectando aquellos nodos que no participan en el contacto, o sea, los situados en la parte semicilíndrica ubicados en la zona trasera del perno, cercano a la base en dirección de la aplicación de la carga. Otras consideraciones relativas a la modelación de la interfase perno-hormigón pueden encontrarse en **Bonilla et al (2007)**

**c) Losa de hormigón:** Este elemento además de interactuar con el conector, se encuentra en contacto con el perfil **I**; al disponerse una película de grasa para impedir la fricción en dicha interfase, se ha considerado a efectos de modelación y de acuerdo con el ensayo, una superficie que involucre solamente contacto normal sin fricción.

Del mismo modo que para el caso del conector tipo en U se ha restringido en la superficie 1 el desplazamiento en el eje X. La losa se encuentra apoyada en la base de la prensa; por ello en la

superficie 3 se ha restringido el desplazamiento en el eje **Z**. Dichas consideraciones son válidas para ambos modelos.

**d) Perfil I:** Se encuentra unido a los conectadores mediante una interfase rígida, ya tratada anteriormente. La carga se aplica de forma distribuida sobre el alma del perfil, de manera similar a lo que se tiene en el experimento en donde se coloca un cabezal suficientemente rígido como para que la carga se transmita de forma distribuida (ver figuras 1 y 2). Los incrementos de cargas se aplican a pequeños intervalos, siendo el tamaño de los mismos seleccionado automáticamente por **ABAQUS** en función de la convergencia numérica. De manera similar a los casos anteriores y para estar en correspondencia con la continuidad del elemento en la superficie 1, se restringe el desplazamiento en el eje **X** y de igual manera se limita el desplazamiento en el eje **Y** de la superficie 2.

### **3.2 Modelación del material**

#### **a) Modelación del acero**

Para la modelación del comportamiento tenso-deformacional del acero se suele adoptar un modelo constitutivo bilineal. **Lam et al (2005)** y **Nie et al (2004)**, así como **Bonilla et al (2007)**, en sus trabajos sobre estructuras mixtas son muestra de ello, o sea, adoptan un comportamiento de este tipo, con criterio de rotura de Von Mises, obteniendo muy buenos resultados que están en correspondencia con la experimentación, evidenciando la factibilidad en el uso de este modelo idealizado para el acero.

#### **b) Modelación del hormigón**

Se han tenido en cuenta dos criterios. El primero utiliza un comportamiento bilineal acorde con lo planteado por **Lam et al (2005)** y el segundo utiliza un modelo de daño plástico (*Concrete Damage Plasticity*) implementado en **ABAQUS**.

De acuerdo con otros trabajos de **Bonilla et al (2007)**, para modelar el comportamiento del hormigón, se ha considerado en el **Modelo II**, además de un modelo constitutivo bilineal, un modelo de daño plástico [**Oller 1996; Lee 1998**], disponible en la biblioteca del sistema **ABAQUS/CAE** versión 6.4, el cual aborda los fenómenos más importantes del hormigón, basado en los principios teóricos del modelo de Mohr-Coulomb modificado. Dicho modelo fue creado para estudiar los efectos de daños irreversibles asociados a los mecanismos de fallos, que ocurren en el hormigón u otro geomaterial, sometido a valores bajos de tensiones de confinamiento.

### **3.4 Estudio y selección del tipo de elemento finito a emplear**

La solución de un problema de ingeniería mediante el método de elementos finitos (MEF) pasa inexorablemente por llevar a cabo un estudio del tipo de elemento finito que mejor represente el comportamiento tenso-deformacional de la estructura que se estudie. En este sentido se trata de



aproximar un campo de desplazamientos a través de una función de aproximación formada por polinomios de interpolación, donde las funciones de forma de los nodos se diferencian para los distintos tipos de elementos finitos. Por tal motivo, las aproximaciones logradas por un tipo de elemento y otro se diferencian entre sí. **ABAQUS** cuenta en su biblioteca con elementos sólidos (3D) con tres tipologías diferentes: los prismáticos de 6 lados, prismáticos de 5 lados (cuñas) y tetraedros (pirámide de base triangular), los cuales pueden pertenecer a las familias lagrangeana o serendípita indistintamente. Atendiendo a ello se ha hecho un estudio para la selección del tipo de elemento más óptimo, capaz de simular con la mayor precisión el verdadero comportamiento físico de la probeta experimental ante las cargas.

Para ilustrar metodológicamente este proceso se ha tomado como ejemplo el **Modelo I**, el cual analiza el estudio del conector con sección en U. Para el caso del **Modelo II** se ha seguido el mismo procedimiento metodológico.

Primeramente se ha discretizado la geometría volumétrica de cada uno de los cuerpos que intervienen en el modelo en elementos del tipo: **C3D8**, **C3D6** y **C3D4**, para una interpolación lineal, con el objetivo de facilitar el proceso de cálculo de la matriz rigidez.

Se han mantenido las mismas condiciones de borde, estados de carga, propiedades físicas y mecánicas de los elementos, respetando la uniformidad en cuanto a tamaño de los elementos para los tres modelos, siendo consecuentes en los tres casos con la interpolación de la geometría y desplazamientos.

En la tabla 1 se observa de forma comparativa las variables de respuesta –carga y desplazamiento- a partir de las soluciones numéricas y experimental. Se ha tomado como referencia el punto de la curva carga – desplazamiento correspondiente al de la carga máxima aplicada, obtenida a partir del ensayo experimental y los valores de carga obtenidos para el desplazamiento experimental dado en dicho punto de referencia. El control del desplazamiento en el modelo virtual ha sido en el punto 1 de la figura 3.

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

<b>Tipo de elemento</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Desplazamiento (m)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
<b>C3D8</b>	114.50	0.0094	36.39
<b>C3D6</b>	132.84	0.0094	26.20
<b>C3D4</b>	<b>178.05</b>	<b>0.0094</b>	<b>0.83</b>
<b>Experimental</b>	<b>180.00</b>	<b>0.0094</b>	<b>0.00</b>

Finalmente se observa que el elemento **C3D4** es el que mejor representa el verdadero comportamiento de la estructura, puesto que el porcentaje de diferencia en cuanto a capacidad de carga máxima obtenida en el modelo virtual utilizando este tipo de elemento con relación a la obtenida en el ensayo es de solamente 0.83 % . (ver tabla 1). Por tanto, el elemento **C3D4** se empleará, en el Modelo I, para los conectadores y la losa de hormigón.

Conviene señalar aquí que para el **Modelo II**, la mejor aproximación se logra discretizando el perno y la losa con elementos **C3D6** (cuña) , tal como se plantea en los trabajos de **Bonilla et al (2007)**. **Lam et al (2005)** coinciden en utilizar elementos en forma de cuña para discretizar el perno.

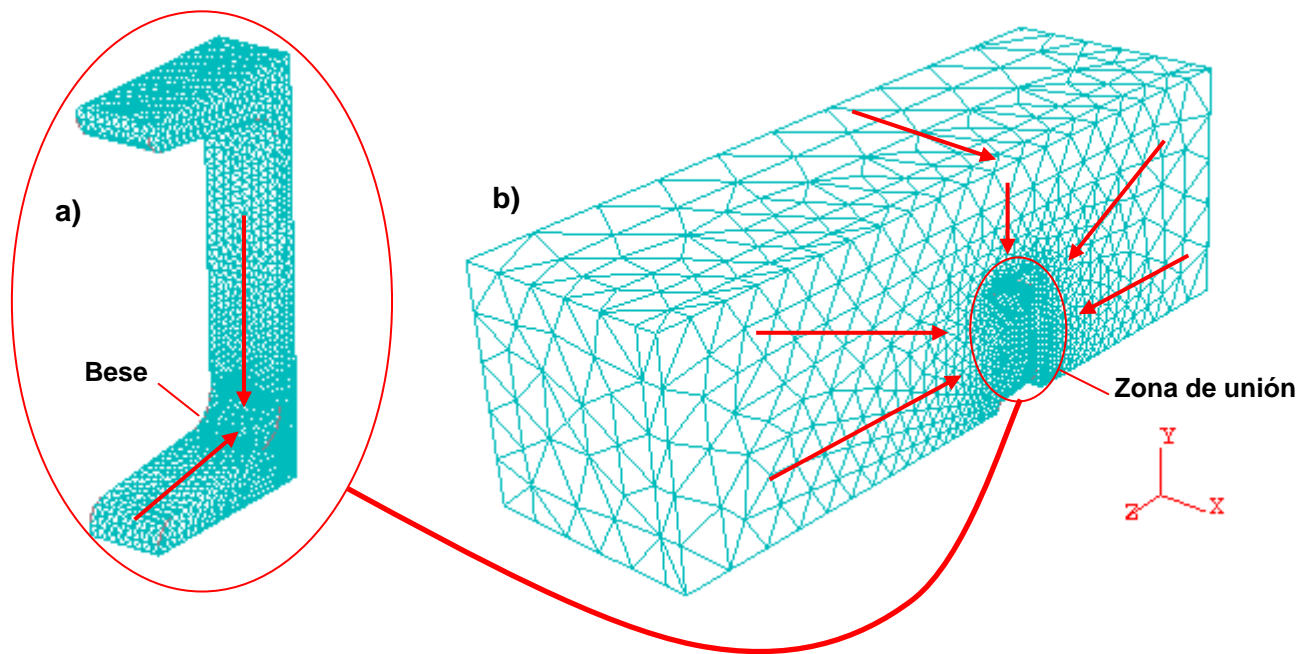
Estos resultados demuestran la necesidad de realizar un análisis encaminado a una adecuada selección del tipo de elemento finito a emplear, aun cuando se esté estudiando un mismo fenómeno, bajo similares condiciones como lo es, en este caso, el ensayo *push out*.

Para discretizar el perfil **I** se utilizan elementos **C3D8**. La forma de este tipo de elemento se adapta muy bien a la geometría de las partes o volúmenes que conforman el perfil. Por otra parte, en dicho perfil no ocurren las mayores concentraciones de tensiones y a efectos del estudio no es el elemento de mayor interés. No es así para el caso del conectador y el hormigón que lo circunda, sobre todo en su base, donde existen elevados gradientes de tensiones y es ahí donde hay que prestar mayor atención en cuanto a la mejora de la interpolación, en base al tipo de elemento y a la densidad de malla.

### **3.5 Estudio y selección de la densidad de malla óptima**

Se debe seleccionar una densidad de malla, para el tipo de elemento escogido, acorde con un adecuado coste de tiempo de computación, al alcance de la tecnología en materia de hardware con que se cuente. En la medida en que se densifica la malla, se incrementa la cantidad de nodos y se mejora la aproximación, aumentando notablemente el coste de computación en cuanto a tiempo de procesamiento [**Bonilla et al 2007**]. La solución no sería densificar deliberadamente la malla en cualquier zona de los cuerpos que componen el modelo. Es necesario prestar atención al problema en cuestión densificando progresivamente el mallado hacia zonas de grandes concentraciones de esfuerzos o elevados gradientes de tensiones.

Se ejemplificará el estudio de densidad de malla para el **Modelo I**, o sea, la probeta que está constituida por el conectador tipo sección en U. Para el **Modelo II** se sigue un procedimiento similar al expuesto seguidamente.



**Figura 4** – Discretización adoptada. a) Conector tipo sección en U  
b) Losa de hormigón.

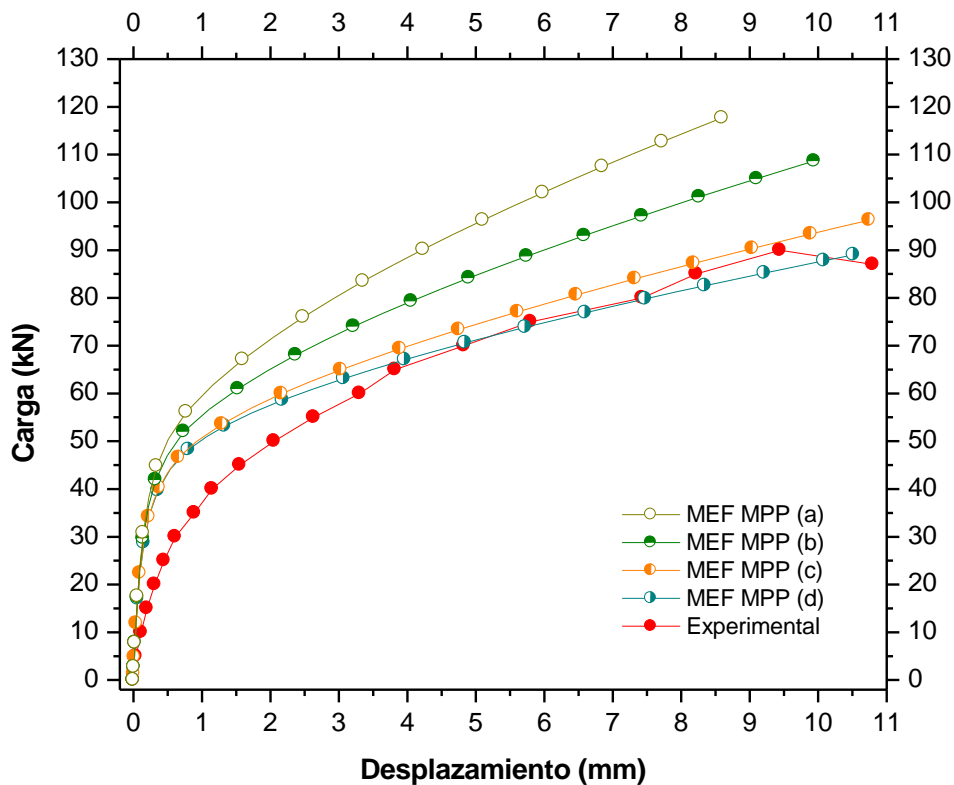
En la figura 4 las flechas indican, tanto para el conector como para la losa, cómo se va incrementando la densidad de malla progresivamente hacia la zona de mayores concentraciones de tensiones. En el conector tipo sección en U los mayores gradientes de tensiones ocurren en su base; para la losa, esto ocurre en la unión, sobre todo en zonas próximas a donde se ubica la base del conector. Este incremento progresivo de la densidad de la malla hacia puntos de interés se logra mediante la aplicación del comando **BIASED** de **ABAQUS/CAE**.

En este modelo se estudiaron cuatro densidades de mallas diferentes, con el objetivo de observar la evolución de la convergencia y seleccionar la densidad de malla óptima. Seguidamente en la Tabla 2 se muestran las configuraciones de las distintas variantes de modelos para las diferentes densidades de malla.

**Tabla 2** - Configuración del modelo para diferentes densidades de malla

Modelo	Volumen	Número de Elementos	Número de nodos
MEF (a)	Canal	1252	464
	Losa	13542	2778
MEF (b)	Canal	2861	916
	Losa	16717	3463
MEF (c)	Canal	5242	1507
	Losa	18694	3958
MEF (d)	Canal	9943	2638
	Losa	Idem. a (c)	Idem. a (c)

En figura 5 se muestra el comportamiento de las curvas carga vs desplazamiento vertical de los modelos teórico y experimental.

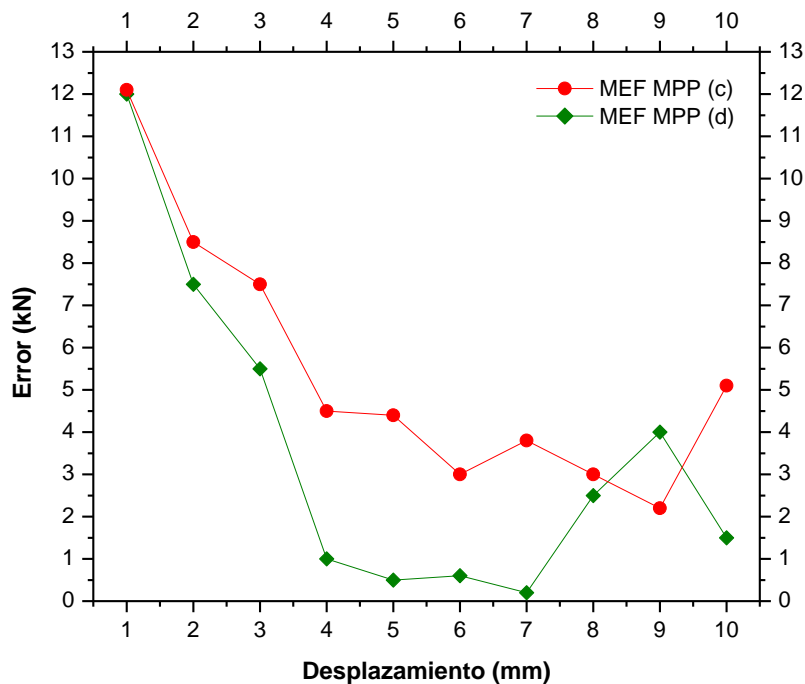


**Figura 5** – Curvas de comportamiento carga - desplazamiento referido a un conector.

Se observa en las curvas de comportamiento obtenidas a partir de los diferentes modelos numéricos que, a medida que se hace más densa la malla, se mejora la aproximación con relación

a la curva experimental. Al observar la figura 5, se concluye que la aproximación lograda por la densidad de malla del modelo **MEF MPP (d)** a la curva experimental es muy buena.

Asimismo, el comportamiento del error absoluto mostrado en la figura 6, para las densidades de malla **MEF MPP (c)** y **MEF MPP (d)**, confirma lo anterior. Realmente no se analizan los errores para las curvas que representan el comportamiento del resto de las densidades de malla, pues no resulta meritorio por la elevada dispersión que se observa en la figura 5. Por otra parte, tampoco se considera necesario determinar otras medidas de error para elegir la malla que mejor responde al verdadero comportamiento de la probeta. **Bonilla et al (2007)** hacen referencia a otras medidas de error que pudieran ser útiles en casos donde no se puede seleccionar con alto grado de exactitud el modelo más preciso. Teniendo en cuenta los criterios antes expuestos, se adopta la densidad de malla del modelo **MEF MPP (d)**.

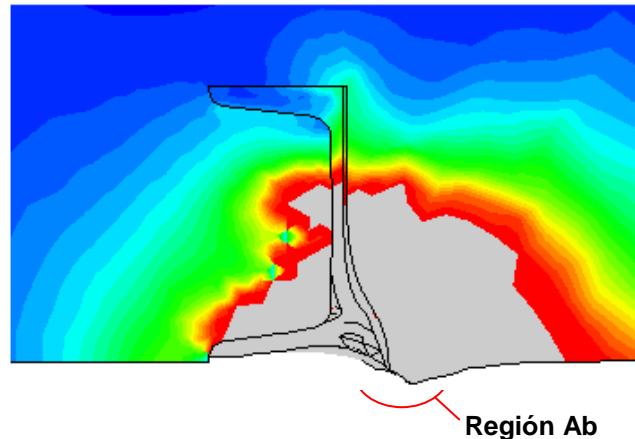


**Figura 6** – Curvas de comportamiento del error absoluto.

## 4. Resultados de la simulación virtual

### a) Probeta de Larrúa (1992)

Como resultado de la simulación virtual se muestra seguidamente una serie de planos de corte, donde se describe el progreso del estado tensional que va teniendo lugar en la probeta. En la figura 7 se observa el cono de tensiones que se forma en el hormigón para la situación de rotura.



**Figura 7** – Cono de tensiones.

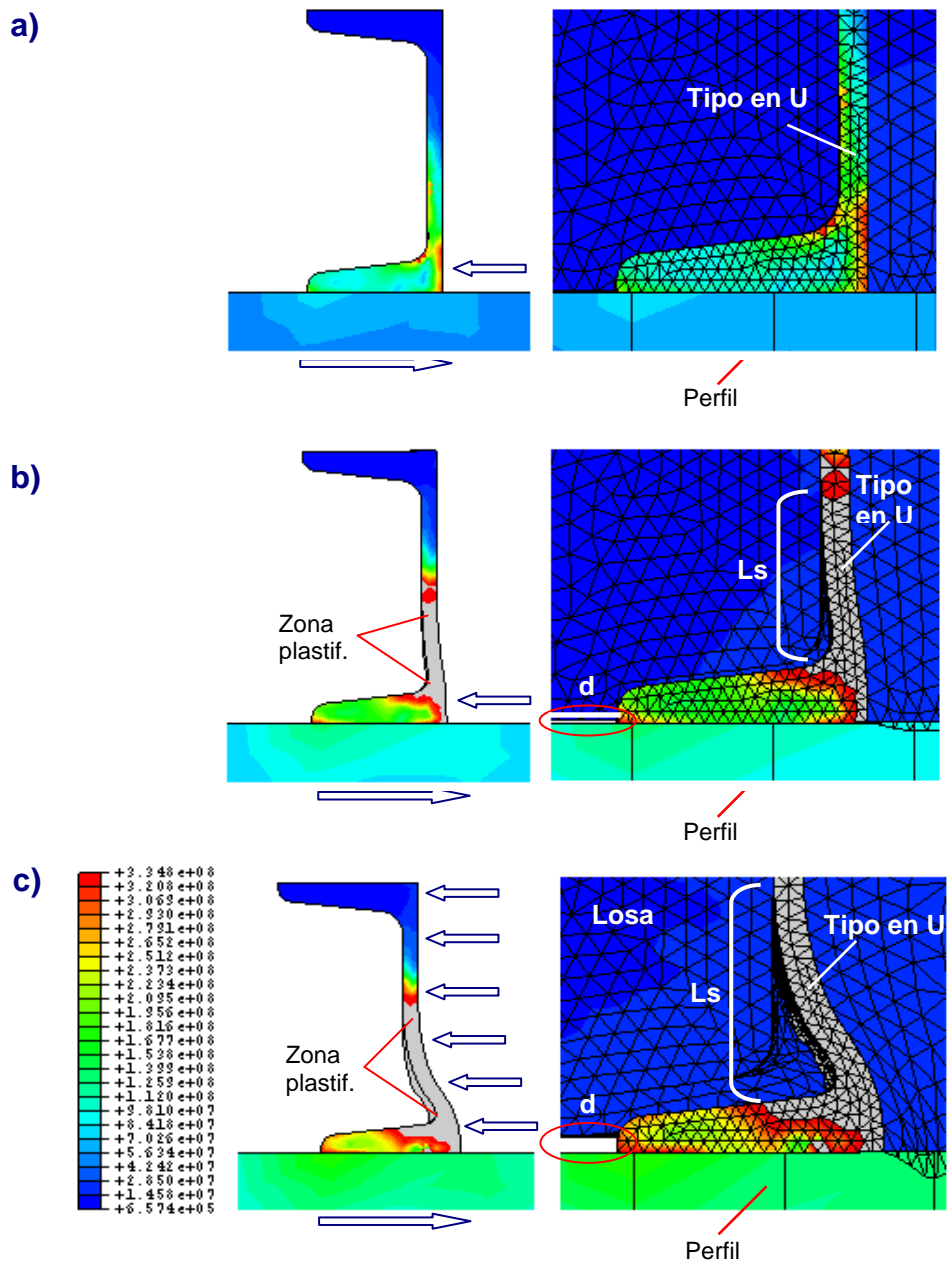
En la figura 8 se muestran tres planos de corte para diferentes escalones de carga, pudiéndose observar la evolución del daño en la unión. Para un tercio de la carga de rotura, (figura 8.a) se observa la aparición de un estado tensional que ocupa desde la base del conector en U hasta la mitad de la altura del alma. Ya para las dos terceras partes de la carga de rotura (figura 8.b) se hacen visibles las deformaciones, así como la pérdida de contacto entre el hormigón y el conector en toda la longitud **L<sub>s</sub>**, incrementándose dicha distancia a medida que aumenta la carga (figura 8.c). Otro detalle importante a señalar es la pérdida de contacto entre la losa y el ala del perfil **I**, en toda la zona **d**. Estos fenómenos se aprecian con igual grado de detalle en el trabajo de **Bonilla et al (2007)**, para el conector tipo perno. En la figura 7 se observa en la región **Ab**, o sea, por delante del conector, un abultamiento en el hormigón, pudiendo ello constituir una de las causas de la separación entre la losa y la viga.

La forma de fallo de la probeta según el experimento se caracteriza por la aparición de una grieta en la zona inferior de la losa de hormigón, apreciable en la cara exterior, tal como se muestra en la figura 9.a. (ver flechas indicando la grieta). La evolución de la abertura de la grieta, medida en el ensayo se muestra en la Tabla

**Tabla 3** – Evolución de la abertura de grieta en el ensayo.

<b>Carga (kN)</b>	<b>Abertura de grieta (mm)</b>
80	0.1
85	0.2
90	0.4

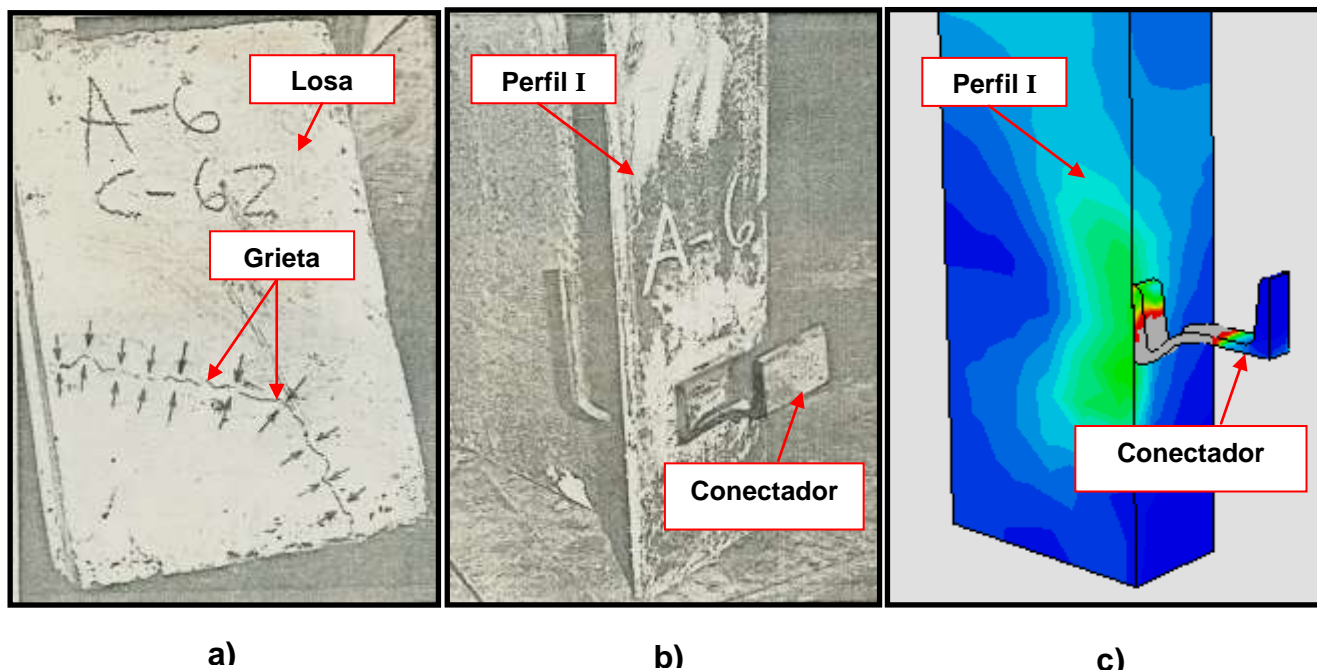
Otro aspecto de gran interés observado en el experimento fue las grandes deformaciones del conector, puestas de manifiesto en la figura 9.b.



**Figura 8** – Estado tenso-deformacional del conector con sección en U.

**a) 30 kN, b) 60 kN, c) 90 kN.**





**Figura 9** – Características del fallo de la probeta: **a)** Agrietamiento del hormigón en la losa, **b)** Deformaciones en el conector, **c)** Deformaciones del conector en el modelo virtual.

Se puede apreciar una gran concordancia entre los resultados derivados del modelo y los obtenidos en el ensayo (ver figuras 5 y 9 y tabla 4).

**Tabla 4** - Comparación entre los resultados experimentales y numéricos de carga máxima para el **Modelo I**

Push Out (kN)	MEF MPP (kN)	P.Out/MPP
90.00	89.02	1.011

**Nota:** Los valores de carga máxima se refieren a un conector.

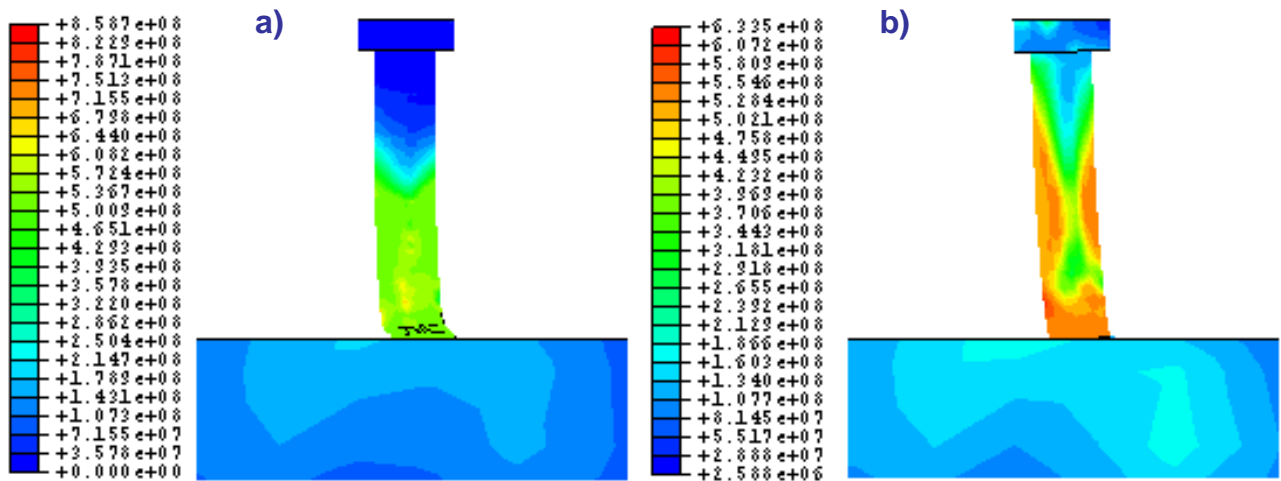
#### **b) Probeta de Chapman y Balakrishnan (1964)**

En este caso no se muestran planos de cortes, para analizar la evolución del daño en la conexión. Ello ya ha sido presentado en otros trabajos relacionados con el conector tipo perno [Bonilla et al, 2007]. En la figura 10 se muestra el estado tenso-deformacional del conector, para la carga de rotura, considerando, en un primer estudio un modelo bilineal **(a)** en ambos materiales y en un

segundo estudio **(b)** un modelo bilineal para el perno y un modelo de daño plástico para el hormigón.

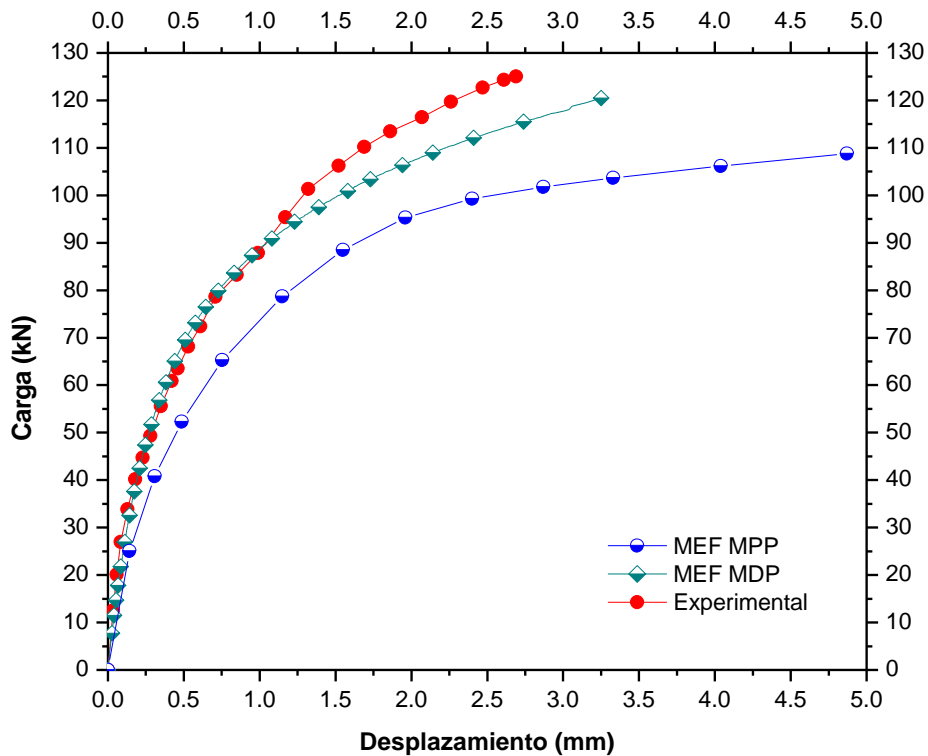
En dicha figura se aprecia que para el caso en que se emplea un modelo de daño plástico para el hormigón, el nivel tensional es significativo en zonas próximas a la cabeza del perno, no siendo así en el caso en que se emplea modelo bilineal, donde las mayores concentraciones de tensiones están más alejadas de la cabeza del conector.

**Chapman y Balakrishnan (1964)** señalan que el fallo estructural en este experimento se produce a cortante en dos de los conectadores ubicados a un lado del perfil.



**Figura 10** – Estado tensional y deformacional del conector. a) Modelo bilineal para ambos materiales, b) Modelo de daño plástico en el hormigón.

Seguidamente se observan las curvas de comportamiento obtenidas experimental y numéricamente.



**Figura 11** – Curvas de comportamiento carga - desplazamiento referidas a un conector.

Al observar la figura 11 se aprecia cierta dispersión entre las curvas numéricas y la experimental. Por otra parte, se observa que la respuesta estructural obtenida mediante los modelos numéricos es más dúctil que la obtenida experimentalmente. Asimismo, la respuesta es más dúctil cuando se emplea un modelo bilineal plástico perfecto para el hormigón.

**Tabla 5** - Comparación entre los resultados experimentales y numéricos para el **Modelo II**

Push Out (kN)	MEF MPP (kN)	MEF MDP (kN)	P.Out/MPP	P.Out/MDP
125.00	108.76	120.50	1.149	1.037

**Nota:** Los valores de carga máxima se refieren a un conector.

En la tabla 5 se muestran los valores de carga máxima obtenidos por la vía numérica y experimental; comparando los mismos, se observa una muy buena concordancia entre el modelo **MEF MDP** y la experimentación. Ello permite validar el modelo empleado en el estudio, eligiendo para el hormigón un modelo de daño plástico.

## Conclusiones

- De los elementos finitos utilizados para discretizar los volúmenes y que se encuentran disponibles en **ABAQUS**, el que mejor describe el comportamiento del ensayo *push out* para el conector con sección en U es el **C3D4**, mientras que para el caso en que se estudia el conector tipo perno, el tipo de elemento más adecuado fue el **C3D6**. Ello pone de manifiesto la necesidad de hacer un estudio para la selección del tipo de elemento, aun cuando se estudie el mismo fenómeno, bajo similares condiciones, como lo es en este caso el ensayo *push out*.
- Teniendo en cuenta la muy buena concordancia entre los resultados numéricos y experimentales, se concluye que todas las hipótesis de trabajo adoptadas en el modelo numérico son acertadas, permitiendo así reproducir de forma más o menos fidedigna el fenómeno físico del problema y, en particular, la respuesta de la conexión.
- Para el conector de sección en U, al igual que para el conector tipo perno, se corrobora lo planteado por **Jayas y Hosain (1987)**, así como por **Kitoh y Sonoda (1990)**, quienes señalan que existe una pérdida de contacto entre el conector y el hormigón debido a la separación que se produce detrás del vástago en una zona cercana a la base, opuesta al sentido de aplicación de la carga.
- Con la utilización de un modelo de daño plástico en el hormigón se reproduce un comportamiento de la conexión más próximo a la respuesta estructural obtenida en el ensayo experimental, lo que muestra la mayor bondad de este modelo constitutivo frente al modelo plástico perfecto del hormigón.
- El estado tenso-deformacional que provoca el conector en U sobre la losa de hormigón describe un cono de tensiones y el posible cono de fallo similar a lo que ocurre en presencia del conector tipo perno. Tal efecto fue observado ya en los trabajos de **Lam et al (2005)** y **Bonilla et al (2007)**
- Para ambos tipos de conectores se ha podido comprobar mediante los modelos numéricos que en la zona de los conectores más próxima a la base es donde se concentran las mayores tensiones.
- La simulación numérica y la experimentación son complementarias entre sí, pues por una parte los ensayos reales permiten calibrar y validar los modelos a partir de las respuestas físicas cuantitativas. Mediante la simulación virtual pueden observarse fenómenos que tienen lugar en el entorno de la conexión, que no pueden ser adecuadamente cuantificados en la experimentación.

## 5. Bibliografía

- 1 ABAQUS. (2003): User's Manual, Ver. 6.4-1, Hibbitt, Karlson and Sorensen, Inc.
- 2 Bonilla J., Larrua R., Mirambell E. y Recarey C. (2007): Aplicación de la simulación numérica al estudio del comportamiento de conectadores tipo perno en estructuras mixtas de hormigón y acero, Revista Ingeniería Civil, CEDEX, Madrid, España.
- 3 Bonilla J., Larrua R., Mirambell E. y Recarey C. (2007): Estudio de la influencia de la resistencia del hormigón en el comportamiento de conectadores mediante simulación numérica y análisis experimental, Revista Ingeniería Civil, CEDEX, Madrid, España.
- 4 Chapman, J. C. y Balakrishnan, S. (1964): Experiments on Composite Beams. Journal of Structural Engineer, Vol 42, No 11, p 369-383.
- 5 Cobelo, W.; Recarey, C.; Castañeda, A. (2004): Análisis de asentamiento de Láminas como estructura de Cimentación. Revista Ingeniería Civil, CEDEX, No 135, p 115-122.
- 6 Davies, C. (1967): Small-Scale Push-Out Tests on Welded Stud Shear Connectors. Journal of Structural Engineer, Vol 40, No 2, p 311-316.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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 96-106.
- 10 Larrúa R. (1992): Cálculo de estructuras mixtas de hormigón y acero sometidas a flexión bajo carga estática con fundamentación experimental de los conectadores. Tesis de Doctorado, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 180 p.
- 11 Lee, J.; and Fenves, G., L. (1998): Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, Journal of Engineering Mechanics, Vol 124, No 8, p 892-900.
- 12 Nie, J. y Cai, C. S. (2004): Steel-Concrete Composite Beams Considering Shear Slip Effects. Journal of Structural Engineering, Vol 129, No 4, p 495-506.
- 13 Oller, S. (1996): Fractura Mecánica. Un enfoque global. CIMNE. Barcelona. 198 p.
- 14 Oller, S. (1996): Modelos constitutivos. Curso sobre métodos numéricos para el cálculo y diseño en ingeniería. Universidad Politécnica de Barcelona, España.
- 15 Oller, S. (2001): Fractura mecánica. Un enfoque global. CIMNE, Primera edición, Barcelona, España, 307 p.

- 16 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.
- 17 Oñate, E. (1995): Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. CIMNE, Segunda edición, Barcelona, España, 830 p.
- 18 Rambo-Roddenberry, M. D. (2002): Behavior and Strength of Welded Stud Shear Connectors. PhD. Thesis University of Blacksburg, Virginia, EE.UU, 245 p.
- 19 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.
- 20 Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. (2000): The Finite Element Method, Butterworth-Heinemann, Fifth edition, Barcelona, Spain. 705 p.