

# Estudio del comportamiento de vigas compuestas de hormigón y acero mediante simulación numérica

## Study of the behavior of composite beams made of concrete and steel by using numerical simulation

Hildemar Hernández<sup>1\*</sup>, Jorge Bonilla\*, Gilberto Rodríguez\*

\* Universidad de Ciego de Ávila, Ciego de Ávila. CUBA

Fecha de Recepción: 05/10/2013

Fecha de Aceptación: 04/03/2014

PAG 5-21

### Resumen

En este trabajo se realiza un estudio preliminar del comportamiento de vigas compuestas de hormigón y acero unidos por conectadores tipo pernos. En el proceso de la simulación numérica se utilizó el programa computacional ABAQUS, el cual está basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Para modelar el comportamiento del acero se utilizó un modelo bilineal con criterio de rotura de Von Mises y un modelo de daño plástico para el hormigón. Los resultados obtenidos, a partir de la simulación numérica de ensayos reales, arrojan muy buena correspondencia con los resultados obtenidos en la experimentación, validando así la utilización del MEF en el estudio de este tipo de estructuras. Se aprecian además fenómenos tenso-deformacionales que se producen en el interior de la estructura. Se estudian además la variabilidad de diversos parámetros físicos y su influencia en el comportamiento de la estructura compuesta, como es el caso de la fricción en la interface losa de hormigón-perfil de acero, así como el espaciamiento entre conectores.

**Palabras claves:** Vigas compuestas, simulación numérica, conectadores tipo perno, comportamiento tenso-deformacional

### Abstract

*The present research develops a preliminary study on the behavior of composite beams made of concrete and steel, which are assembled by bolt-type connectors. The numerical simulation process employed software named ABAQUS, which is based on a Finite Element Method (FEM). In order to model the steel behavior, a bilinear model with failure criterion by Von Mises was employed, as well as concrete damage plasticity model. The results obtained from a numerical simulation on real tests show a quite appropriate relationship with results obtained from trial test, thus validating the use of FEM for the study of these kinds of structures. Besides, some strain-stress phenomena take place, which are produced inside the structure. Variability of diverse physical parameters and their influence on the behavior of the composite structure are also studied, such as the case of friction in the concrete slab-structural steel interfaces, as well as in the spacing areas between connectors.*

**Keywords:** Composite beams, numerical simulation, stud connectors, stress-strain behaviour

## 1. Introducción

Para el estudio del comportamiento de estructuras compuestas, específicamente de la conexión, la experimentación fue el punto de partida sobre el cual se fundamentaron los primeros métodos de cálculo, desarrollados a partir de ensayos de conectadores [Davies (1969), Larrúa (1992), Rambo-Roddenberry (2002)]. Aunque en menor medida se han empleado como medio complementario de corroboración ensayos de vigas a flexión.

En la actualidad existe la tendencia de utilizar la simulación numérica como herramienta para estudiar el comportamiento de conectadores a un costo mínimo de recursos, logrando una adecuada correspondencia con el modelo físico (ensayo push out), destacándose como antecedentes a la presente investigación, los trabajos realizados por Lam y Ellobody (2005), Recarey et al. (2005), Ellobody y Young (2006), Bonilla et al. (2007 a) (2007 b) (2007 c) y Bonilla et al. (2010).

## 1. Introduction

*In order to study the behavior of composite structures, specifically the connection area, experimental tests constitute the starting point from which the first calculation methods are based on. Methods were developed from connectors tests [Davies (1969), Larrúa (1992), Rambo-Roddenberry (2002)]. Although, to a small extent, verification tests on bending beams have also been employed as complementary corroboration means.*

*Nowadays, there is a trend to employ numerical simulation as a tool for the study of the behavior of connectors, using the least possible resources, to achieve an adequate relationship with the physical model (push out test). It is worthwhile mentioning previous research works developed by Lam and Ellobody (2005), Recarey et al. (2005), Ellobody and Young (2006), Bonilla et al. (2007 a) (2007 b) (2007 c) and Bonilla et al. (2010).*

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:

Profesor e Investigador, Universidad de Ciego de Ávila. Carretera a Morón km 9  
½. Cuba  
E-mail: [hildemar@ingenieria.unica.cu](mailto:hildemar@ingenieria.unica.cu)



En este trabajo para estudiar el comportamiento tenso-deformacional de vigas compuestas se ha utilizado la simulación numérica y la experimentación como patrón de calibración y validación, basándose en el Método de los Elementos Finitos (MEF) que está implementado en el programa computacional ABAQUS. Se considera la no linealidad del acero y del hormigón, se plantea además el procedimiento para acometer la simulación virtual del ensayo de vigas compuestas, tratándose aspectos relacionados con la concepción geométrica del modelo, el aprovechamiento de la simetría físico-mecánica y de las cargas, así como la definición de las condiciones de borde e interfase entre los cuerpos que componen la probeta virtual. 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 exponen los resultados del estudio del comportamiento de vigas compuestas de hormigón y acero, validando así la utilización de la simulación numérica, se describe el comportamiento de la estructura al considerar diferentes valores de coeficientes de fricción en las interfaces losa-perfil y para otras condicionantes geométricas y mecánicas del modelo. Se estudia además la influencia del espaciamiento entre conectadores en la capacidad resistente última de la estructura.

## 2. Descripción del espécimen

Las características de la probeta objeto de estudio, se corresponde con la probeta D4 de la Serie 2, perteneciente a los ensayos realizados por Davies (1969). La probeta está constituida por un perfil I de acero (BSB 5 in x 3 in x 9 lb ó UB 127 mm x 76 mm x 13 kg/m) con una resistencia característica de acero de 301 MPa, una losa de hormigón de 15 in (381 mm) de ancho y 2 ½ in (63.5 mm) de espesor, con 35 MPa como resistencia del hormigón y reforzada con acero. La conexión losa-perfil se logra mediante pernos de 450 MPa de resistencia última a la tracción, colocados en el centro de la viga y espaciados a 1 ½ in (38.1 mm). La viga cubre una luz de 4 pies (1220 mm). En la investigación experimental se le untó una película de lubricante en la zona de contacto entre perfil de acero y la losa de hormigón.

La Figura 1 muestra la viga compuesta y la distribución de los conectadores, así como un detalle de la sección transversal de la viga compuesta.

*In order to study the strain-stress behavior of composite beams in this research, numerical simulation has been used and, also tests such as calibration and validation standards, based on the method of finite elements (FEM) implemented by the software ABAQUS. Non-linearity of steel and concrete are considered. Besides, the procedure to carry out a virtual simulation of composite beam test is proposed, considering aspects related to the geometrical conception of the model, by taking advantage of physical-mechanical symmetry and loads, and also defining the edge and interface conditions between the elements making up the virtual specimen. The whole procedure is approached for calibration, which is related to the selection of finite element type and, the selection of optimal mesh density. Finally, the results of the study of composite concrete-steel beams behavior is released, thus validating the use of numerical simulation. The behavior of the structure is described by considering different values of friction coefficients in the slab-structural steel interface, and other geometrical and mechanical conditions in the model. The influence of spacing area between connectors on the structure ultimate strength capacity is also studied.*

## 2. Description of the specimen

The characteristics of the specimen under study correspond to specimen D4 from Series 2, pertaining to the studies developed by Davies (1969). The specimen is made up of a structural steel I (BSB 5 in x 3 in x 9 lb or UB 127 mm x 76 mm x 13 kg/m), with a typical steel strength of 301 MPa, a concrete slab of 15in (381 mm) width and, 2 ½ in (63.5 mm) thickness, with 35 MPa for steel reinforced concrete resistance. The connection slab-structural steel is achieved by means of bolts with a 450 MPa ultimate tensile resistance, allocated in the beam center and spaced at 1 ½ in (38.1 mm). The beam covers a span of 4 feet (1220 mm). In the experimental study, the beam was covered with a lubricating film on the contact area, between the structural steel and the concrete slab.

Figure 1 shows the composite beam and distribution of connectors, as well as the beam cross section in detail.

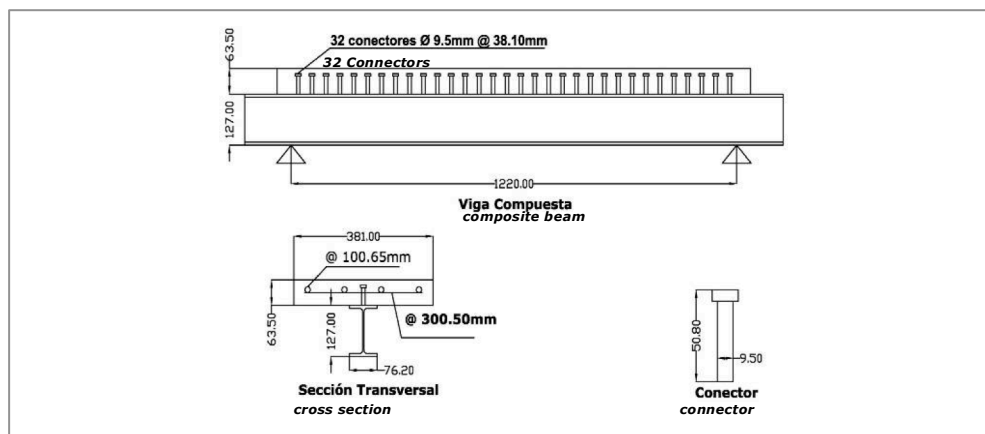


Figura 1. Detalle del espécimen  
Figure 1. Specimen in detail

### 3. Modelación virtual del ensayo de vigas compuestas sometidas a flexión

#### 3.1. Modelación de la geometría

Se ha adoptado la modelación tridimensional de la probeta (3D), gracias a las bondades en cuanto a representación geométrica que brinda ABAQUS/CAE, siendo consecuente con la configuración del ensayo experimental.

Dada la complejidad geométrica en cuanto al costo computacional que genera simular la totalidad de la probeta en ABAQUS, se realiza una simplificación por simetría modelándose la cuarta parte de la probeta, aspecto que ha sido empleado y validado en trabajos precedentes Bonilla et al. (2007 a) (2007 b) (2007 c) y Bonilla et al. (2010) donde se obtiene muy buena correspondencia con los resultados experimentales. Las partes que componen el modelo son: conectadores tipo perno, losa de hormigón armado y perfil de acero.

#### 3.2. Modelación de las condiciones de apoyo, frontera o borde

**a) Perno:** En el perno existen dos superficies de interacción, una garantizando la unión perno-perfil y otra la unión perno-hormigón.

La unión perno-perfil es tratada como una unión rígida, pues en la probeta real esta se logra mediante un cordón de soldadura en todo el perímetro que circunda la base del perno.

La interfase perno-hormigón fue tratada al igual que en el caso anterior como rígida, aunque se sabe que en realidad no hay una continuidad total entre los dos materiales, pero sí una gran fuerza de fricción en algunas zonas de la superficie del perno, dados los elevados esfuerzos normales que se originan, sobre todo en vecindades de la base del conector.

Lam y Ellobody (2005) en su investigación utiliza un contacto rígido en la interfase perno-hormigón, desconectando aquellos nodos que por experimentos reales se ha comprobado no participan en el contacto, esta problemática también ha sido abordada en los trabajos de Bonilla et al. (2007 b) y Bonilla (2008).

**b) Losa:** En la zona donde existen contacto entre la losa y el perfil se supuso que existía solo contacto o esfuerzo normal ya que en el modelo experimental no se considera fuerza de rozamiento o contacto tangencial por haberse colocado una película de grasa entre los dos materiales.

**c) Perfil:** Anteriormente se trataron los tipos de contactos que se asumió para las diferentes interacciones entre el perno y perfil, así como entre el hormigón y perfil. Teniendo en cuenta la simplificación por geometría aplicada al modelo experimental se consideró para la cuarta parte de la probeta modelar un apoyo articulado, donde se restringe los desplazamientos en los ejes X y Y, permitiendo el desplazamiento en el eje Z. Para ser consecuente con la simplificación simétrica aplicada a la probeta, se restringió en el sentido del eje X el desplazamiento de la Superficie 1, producto al corte aplicado por dicho eje, de igual modo en el eje Z se restringe el desplazamiento de la Superficie 2 para simular el corte aplicado a la probeta (ver Figura 2).

### 3. Virtual modeling test of composite beams exposed to tensile stress

#### 3.1. Modeling geometry

*The tri-dimensional modeling of the specimen (3D) has been adopted, thanks to favorable geometrical representation provided by ABAQUS/CAE, which is consistent with the experimental test layout.*

*Because of the geometrical complexity and the high cost involved in creating the whole specimen by the ABAQUS software, a simplified specimen was created by symmetry modeling only a quarter of the specimen. This solution has been employed and validated by previous studies, such as Bonilla et al. (2007 a) (2007 b) (2007 c) and Bonilla et al. (2010), obtaining an adequate relationship with experimental results. The model is made up of: bolt type connectors, reinforced concrete slab and structural steel.*

#### 3.2. Modeling support, limit or edge conditions

**a) Bolt:** *there are two interaction surfaces in a bolt. One enables the connection bolt-structural steel and the other the linkage bolt-concrete.*

*The bolt-structural steel connection is treated as a rigid joint, as in the real specimen the connection is achieved by means of a wheel bead around the whole perimeter surrounding the bolt base.*

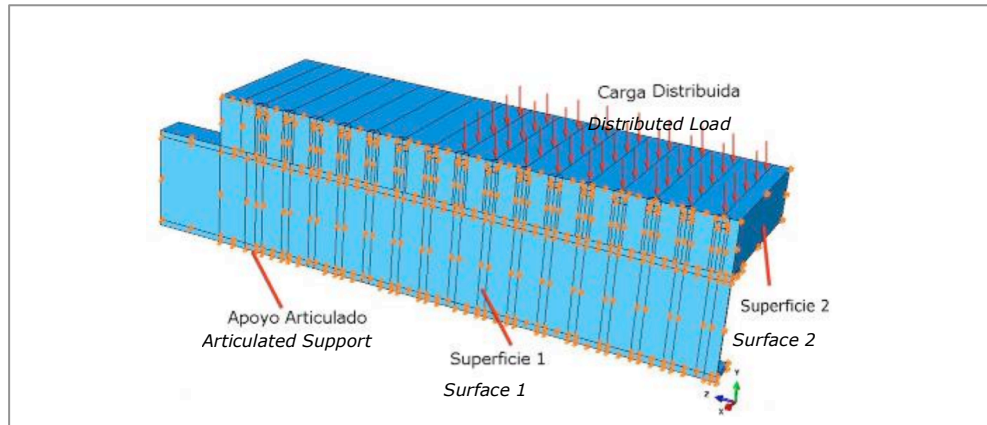
*The bolt-concrete interface was treated as a rigid joint, just the same as the previous connection, although it is well known that there is no continuity between both materials. However, there is a great friction stress in some areas of the bolt surface, because some high regular stresses take place, especially around the connector base.*

*Lam and Ellobody (2005) used a rigid contact for the bolt-concrete interface, disconnecting those nodes that do not participate in the contact effect, as reported by real experimental tests. This predicament has also been considered by Bonilla et al. (2007 b) and Bonilla (2008).*

**b) Slab:** *on the surface where the slab and structural steel get in contact, it was assumed that only contact or regular stress took place, since in the experimental model there is no friction area or tangential contact, provided that there is a grease layer between both materials.*

**c) Structural steel:** *All types of contact were previously treated for different interactions between bolt and structural steel, as well as for concrete and structural steel. Considering the geometrical simplification applied to the experimental model, it was decided to model an articulated support for the quarter of specimen, where displacement of axes X and Y are restricted but allowing the displacement in the axis Z. Being consistent with the symmetric simplification applied to the specimen, the displacement of Surface 1 was restricted in X axis direction, because of the cutting off applied by such axis. Similarly, the displacement of Surface 2 is restricted in Z axis direction, in order to simulate the cut off applied to the specimen (see Figure 2).*





**Figura 2.** Probeta virtual. Condiciones de apoyo, frontera o borde y carga aplicada  
**Figure 2.** Virtual specimen. Conditions of support, limit or edge and applied load

### 3.3. Modelación de la carga

La carga es aplicada de modo distribuido en un área en el centro de la viga para evitar altas concentraciones de tensiones y para simular el experimento real. Los incrementos de carga son aplicados mediante el algoritmo RIKS en pequeños intervalos, donde el tamaño de estos es seleccionado automáticamente por el código ABAQUS basado en las condiciones de convergencia numérica. La base de dicho algoritmo es el método de Newton-Raphson y es generalmente utilizado para predecir el colapso de una estructura.

### 3.4. Modelación de los materiales

#### 3.4.1. Modelación del acero

Para la modelar el comportamiento tenso-deformacional del acero se tuvo en cuenta los trabajos de Nie y Cai (2004), Lam y Ellobody (2005), Ellobody y Young (2006), así como Bonilla et al. (2007 b) sobre modelación de estructuras compuestas, en los cuales se ha adoptado un comportamiento bilineal para el acero con criterio de rotura de Von Mises. En estos trabajos se evidencia gran correspondencia entre la experimentación y la simulación numérica, hechos que validan la utilización de dicho criterio para modelar el acero. Para aplicar este comportamiento se utiliza el comando \*PLASTIC del código ABAQUS.

#### 3.4.2. 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) y Bonilla et al. (2010), donde ha sido validado mediante la 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.

### 3.3. Modeling load

The load is applied and distributed on a surface at the beam mid span, so as to avoid high concentrations of stresses and to simulate the real experimental test. Load increments are applied by the RIKS algorithm at small intervals, where the size of them is automatically selected by the ABAQUS code, which is based on numeric convergence conditions. Such algorithm is based on the Newton-Raphson method, which is normally employed to predict the collapse of a structure.

### 3.4. Modeling materials

#### 3.4.1. Modeling steel

In order to model the steel strain-stress behavior, the studies developed by Nie and Cai (2004), Lam and Ellobody (2005), Ellobody and Young (2006), and Bonilla et al. (2007 b) were considered. Such studies deal with composite structures modeling, where a bilinear behavior was adopted for steel, using the breaking criterion developed by Von Mises. These studies show high relationship between experimental tests and the numerical simulation. The outcomes validate the use of such criterion for modeling steel. In order to apply this behavior, \*PLASTIC command from ABAQUS code is used.

#### 3.4.2. Modeling concrete

In order to model steel behavior, in its non-linear stage, the Concrete Damage Plasticity model was employed, which is implemented by ABAQUS code. Such model properly reproduces the concrete non-linear behavior and it was selected considering the adequate results obtained from previous studies developed by Bonilla et al. (2007 b), Bonilla (2008) and Bonilla et al. (2010). The model was validated by these authors, because there is a proper relation between the virtual model and the experimental tests. This study does not report details on the calibration of this model, but details can be found on researches previously quoted.



### 3.5. Estudio y selección del tipo de elemento finito a emplear

El ABAQUS cuenta en su biblioteca de elementos sólidos (3D) con tres tipologías diferentes: los prismáticos de 6 lados, los prismáticos de 5 lados (cuñas) y los tetraedros (pirámide de base triangular), los cuales pueden pertenecer a las familias lagrangeanas o serendípita indistintamente.

Para el proceso de selección del elemento finito a emplear, se corrieron una serie de modelos con diferentes configuraciones entre los tipos de elementos y fue escogida la configuración que mejor aproximó el comportamiento del modelo numérico al modelo experimental.

El estudio muestra que para la discretización del conector se deben emplear elementos C3D8R, lo cual está en correspondencia con las investigaciones precedentes de Bonilla et al. (2007 b) y Bonilla (2008), además que se adapta muy bien a la geometría de dicho cuerpo. Para la discretización del hormigón y del ala superior del perfil (zona del perfil en contacto con el hormigón) se deben emplear elementos C3D6, sin embargo para el resto del perfil elementos C3D8R. La diferencia entre los resultados experimentales y numéricos en cuanto a capacidad de carga de la estructuras fue de 4.46 %.

### 3.6. Estudio y selección de la densidad de malla óptima

Con la selección del tipo de elemento finito a emplear no es suficiente, se debe conocer además el tamaño adecuado de estos elementos que serán utilizados para la discretización. Por tal motivo se realiza un estudio de la densidad de malla donde se toma como patrón de comparación la precisión que se obtiene entre simulación y experimentación.

### 3.5. Study and selection of the type of finite element to be used

ABAQUS owns a program library with solid (3D) elements, with three different typologies: 6-sides binoculars, 5-sides binoculars (wedge) and tetrahedrons (pyramid of triangular base), which may belong to lagrangian or serendipite branches, indistinctly.

For the selection process of the finite element to be employed, a set of models with different configurations were run. The selected configuration was the one having the numerical model behavior closest to the experimental model.

This study indicates that to complete discretization of connector, elements C3D8R shall be employed, which is consistent with previous researches developed by Bonilla et al. (2007 b) and Bonilla (2008), because this connector properly adapts itself to the geometry of such body. For discretization of concrete and the upper wing of the structural steel (structural steel area in contact with concrete) elements C3D6 shall be employed. However, for the rest of structural steel, C3D8R elements shall be used.

### 3.6. Study and selection of optimal mesh density

Choosing the type of finite element to be used is not enough, it is required to obtain the adequate size of the finite elements to be used for discretization. Therefore, a study is developed to achieve mesh density, where accuracy is considered as the pattern to compare simulation with experimental tests.

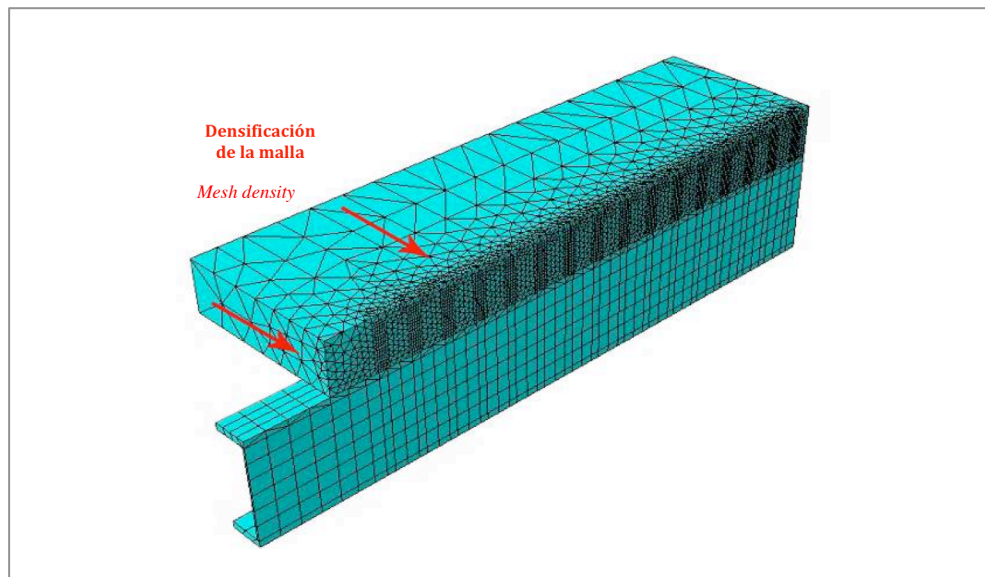


Figura 3. Modelo discretizado  
Figure 3. Discrete model

Se analizaron tres densidades de malla diferentes en cada una de las partes que constituyen la viga compuesta (losa hormigón, perfil I y perno) ver Figura 3. En el perno y el perfil se utilizó una distribución uniforme del tamaño de los elementos de la malla.

Three different mesh densities were analyzed for each element making up the composite beam (concrete slab, structural steel I and bolt), see Figure 3. For the bolt and structural steel, a uniform distribution of the mesh elements size was employed.



En la losa se puede observar como va aumentando progresivamente la densidad de malla hacia la zona de mayor interés, donde se producen en este caso la mayor concentración de tensiones, o sea el contacto entre el perno y la losa. La discretización se realizó en correspondencia con las consideraciones planteadas en los trabajos de Bonilla et al (2007 b) y Bonilla (2008).

En la Tabla 1 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.

*The slab shows the progressive increase of density towards the interest zone, where the highest concentration of stresses take place, that is to say the area between the bolt and the slab. Discretization was carried out in accordance with the considerations established by Bonilla et al (2007 b) and Bonilla (2008).*

*Table 1 shows the mesh density employed by each model in different zones, as well as the achieved loading capacity and errors expressed in percentages, in regards with the calibration experimental test.*

**Tabla 1.** Configuración del modelo para diferentes densidades de malla

**Table 1.** Model configuration for different mesh densities

Modelo/ Model	Región/Zone	Cantidad de Elementos/ Amount of elements	Cantidad de Nodos/ Amount of nodes	Capacidad de Carga/ Loading capacity (kN)	Diferencia/ Difference(%)
MEF (a)	Hormigón/ Concrete	33900	20269	156.24	12.08
	Perfil/ S. Steel	810	1375		
	Conector/ Connector	132	229		
MEF (b)	Hormigón/ Concrete	40890	24756	133.18	4.46
	Perfil/ S. Steel	918	1540		
	Conector/ Connector	192	325		
MEF (c)	Hormigón/ Concrete	51133	30274	136.37	2.17
	Perfil/ S. Steel	1491	2520		
	Conector/ Connector	212	357		
<b>Estudio experimental Viga / Experimental study, Beam – D4 [Colin Davies (1969)]</b>				<b>139.4</b>	<b>0.00</b>

Creadas todas las consideraciones en la modelación se tiene un esquema general que permite el estudio de diferentes parámetros, tomando como partida la probeta calibrada.

*Once the model considerations were established, a general layout is obtained that enables the study of different parameters, taking as base a calibrated specimen.*

#### 4. Comportamiento de vigas compuestas de hormigón y acero

Se realizaron un total de treinta y seis ensayos virtuales a escala real de las vigas compuestas, las cuales presentan una luz libre de 4.0 m. La sección transversal de la losa de hormigón es de 0.20 x 0.14 m siendo constante en todos los modelos, así como la resistencia a compresión del hormigón que se mantuvo con 30 MPa. Los conectadores mantuvieron sus características geométricas constantes, utilizándose pernos de 110.0 mm de peralto y 16.0 mm de diámetro, conformándose modelos con tres espaciamentos entre conectores diferentes, donde la resistencia última a tracción del acero es de 450 MPa. En el perfil se utilizaron dos peraltos diferentes, uno de 127.0 mm que corresponde al perfil designado por UB 127 x 76 x 13 y otro de 254.0 mm designado por UB 254 x 102 x 22 ambos pertenecientes al surtido de perfiles de acero británicos (British Standard Beam), la resistencia del acero es de 300 MPa para los perfiles. Los resultados obtenidos en estos modelos se exponen en la Tabla 2.

#### 4. Behavior of concrete-steel composite beams

*A total of thirty six virtual and full scale tests were developed on composite beams, which have a free span of 4.0 m. The slab cross section length is of 0.20 x 0.14 m, which is constant for all models. Compressive resistance was established at 30 MPa. Connectors kept constant geometrical characteristics, using bolts of 110.0 height and 16.0 mm diameter, thus producing models with three spacing areas between connectors, where the ultimate steel tensile stress is 450 MPa. For structural steel two different heights were used, one of 127.0 mm, corresponding to the structural steel described by UB 127 x 76 x 13, and other of 254.0 mm described by UB 254 x 102 x 22, both in accordance with the British Standard Beam. The steel strength is 300 MPa for structural steels. The results achieved by these models are shown by Table 2.*



**Tabla 2.** Resultados de los modelos numérico realizados  
*Table 2. Results achieved by numerical models*

Modelo/Model	Peralto del perfil / Structural Steel Height (mm)	Esp. Entre pernos / Spacing area between bolts (mm)	Coefficiente Fricción/ Friction Coefficient	Capacidad de carga/ Loading capacity (Distrib. kN/m)	Capacidad de carga/ Loading capacity (Concent. kN)
A1-A-C	127	15	0	-	118.10
A1-A-D	127	15	0	124.49	-
A1-B-C	127	15	0.15	-	118.31
A1-B-D	127	15	0.15	124.52	-
A1-C-C	127	15	0.30	-	122.37
A1-C-D	127	15	0.30	124.53	-
A2-A-C	127	30	0	-	100.76
A2-A-D	127	30	0	101.33	-
A2-B-C	127	30	0.15	-	101.13
A2-B-D	127	30	0.15	104.32	-
A2-C-C	127	30	0.30	-	101.27
A2-C-D	127	30	0.30	108.46	-
A3-A-C	127	45	0	-	86.64
A3-A-D	127	45	0	73.61	-
A3-B-C	127	45	0.15	-	87.95
A3-B-D	127	45	0.15	73.61	-
A3-C-C	127	45	0.30	-	88.44
A3-C-D	127	45	0.30	73.63	-
B1-A-C	254	15	0	-	230.82
B1-A-D	254	15	0	244.25	-
B1-B-C	254	15	0.15	-	257.42
B1-B-D	254	15	0.15	248.67	-
B1-C-C	254	15	0.30	-	257.77
B1-C-D	254	15	0.30	251.60	-
B2-A-C	254	30	0	-	192.72
B2-A-D	254	30	0	179.58	-
B2-B-C	254	30	0.15	-	199.25
B2-B-D	254	30	0.15	186.16	-
B2-C-C	254	30	0.30	-	205.17
B2-C-D	254	30	0.30	188.90	-
B3-A-C	254	45	0	-	174.93
B3-A-D	254	45	0	136.77	-
B3-B-C	254	45	0.15	-	177.67
B3-B-D	254	45	0.15	137.06	-
B3-C-C	254	45	0.30	-	178.83
B3-C-D	254	45	0.30	147.13	-

#### 4.1. Descripción del comportamiento tenso-deformacional de las vigas compuestas

La viga compuesta objeto de estudio, está conformada por un perfil I de acero y una losa de hormigón sobre el ala superior del perfil, uniendo ambos materiales por conectadores tipo perno. Generalmente y en función de la posición de la línea neutra, la losa de hormigón asume los esfuerzos a compresión a que es sometida la viga producto a la flexión. Por su parte el perfil I de acero o parte de este, es el encargado de resistir los esfuerzos de tracción al flexionarse la estructura en su conjunto. Los conectadores serán los encargados de unir la losa de hormigón y el perfil de acero, tratando de impedir el deslizamiento y la separación entre ambos materiales (acero y hormigón) para así garantizar un trabajo estructural conjunto, aprovechando las propiedades de ambos materiales.

En la Figura 4 se observa un detalle de las tensiones en la losa de hormigón, tanto para carga concentrada como para carga distribuida. Puede observarse como en la zona delantera de la base del conectador, se genera lo que se conoce como cono de transmisión de tensiones o cono de falla, producto a la transmisión de esfuerzos del hormigón al perno, el cual transmite a su vez estas tensiones al perfil, corroborando las observaciones realizadas en los estudios de Bonilla et al (2007 b). Se observa el incremento del cono de tensiones en la medida que los conectadores están más próximos al apoyo de la viga. Sin embargo en las vigas donde la carga es concentrada, se observa como los conos de tensiones pertenecientes a cada conexión, presentan valores de tensiones semejantes.

Observando los modelos virtuales se corroboran los planteamientos realizados por Jayas y Hosain (1988), Kitoh y Sonoda (1990), además por Bonilla et al. (2007 b), quienes afirman que existe una pérdida de contacto en la zona trasera del conectador opuesta al sentido de aplicación de la carga.

#### 4.1. Description of strain-stress behavior of composite beams

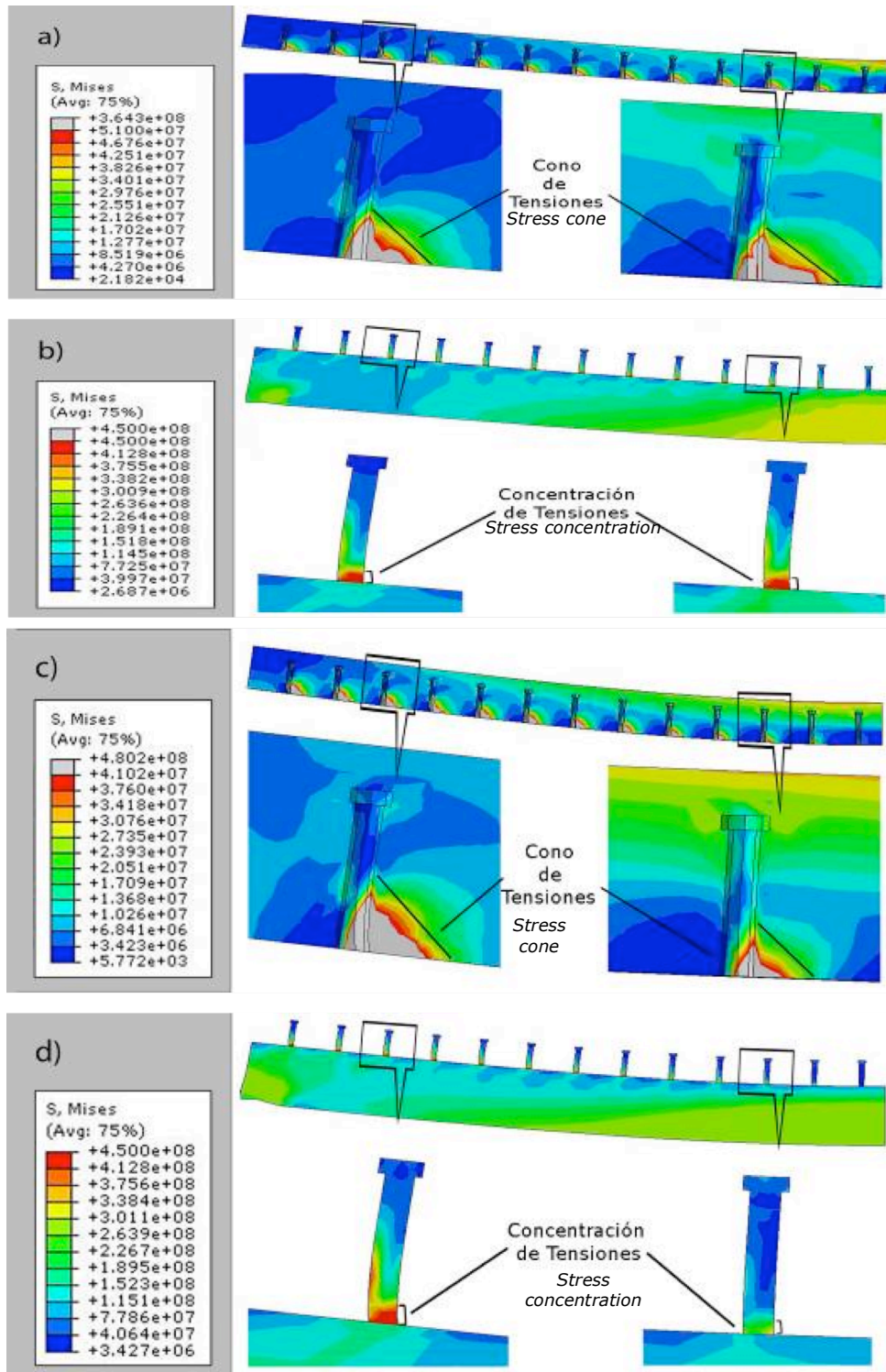
*The studied composite beam is made of structural steel I and a concrete slab in the structural steel upper wing; both materials are joined together by bolt-type connectors. Generally, in function of the neutral line position, the concrete slab endures the compressive stress applied to the beam due to bending stress. Consequently, structural steel, or part of it, endures the tensile stresses when the structure bends as a whole. Connectors are in charge of joining the concrete slab and the structural steel, trying to avoid displacement and detachment of both materials (steel and concrete), thus ensuring a combined structural performance and taking advantage of both materials properties.*

*Figure 4 shows a detail of stresses endured by concrete slab, for concentrated load as well as for distributed load. In the front area of the connector base, we can observe that a stress transmission cone or failure cone takes place, provoked due to the stress transmission from concrete to the bolt, which in turn passes the stress to the structural steel. Above proves the statements developed by Bonilla et al (2007 b). There is an increment of stress cone as long as connectors are closer to the beam support area. However, in the beams area enduring concentrated load, it is observed that stress cones in each connection have similar stress values.*

*By observing the virtual models, the statements developed by Jayas and Hosain (1988), Kitoh and Sonoda (1990), and also by Bonilla et al. (2007 b) are confirmed. These authors state that there is a loss of contact in the back side of the connector, which is opposite to the applied load direction.*







**Figura 4.** Detalle de la simulación. a) Detalle de la losa con carga concentrada. b) Detalle del perno con carga concentrada. c) Detalle la losa con carga distribuida. d) Detalle del perno con carga distribuida

**Figure 4.** Detailed simulation. a) Detail of slab with concentrated load. b) Detail of bolt with concentrated load. c) Detail of slab with distributed load. d) Detail of bolt with distributed load



#### 4.2. Influencia de la fricción en la capacidad de carga de la sección

En el estudio de la interface se utilizaron tres valores del coeficiente de fricción (0.00; 0.15 y 0.30) para cada uno de los perfiles de acero utilizados, así como para cada uno de los espaciamientos entre conectadores estudiados. Para exponer los resultados se muestran las gráficas (Figura 5), donde se agrupan los resultados de la simulación de las vigas compuestas.

Analizando los valores de carga para cada coeficiente de fricción que se muestra, se observa que los valores de carga última aumentan en la medida que aumenta el coeficiente de fricción empleado en cada caso. Estos incrementos no son significativos pues no sobrepasa el 5 % de la capacidad de carga última.

#### 4.2. Influence of friction on the section loading capacity

The study of the interface employed three friction coefficient values (0.00; 0.15 and 0.30) for each employed structural steel and, for each spacing area between connectors under analysis. The charts on Figure 5 show the results for composite beam simulation.

By analyzing load values for each friction coefficient, it is observed that ultimate loading values increase, as long as the friction coefficient rises, in each case. Such increments are not relevant, as they do not exceed the 5% of ultimate loading capacity.

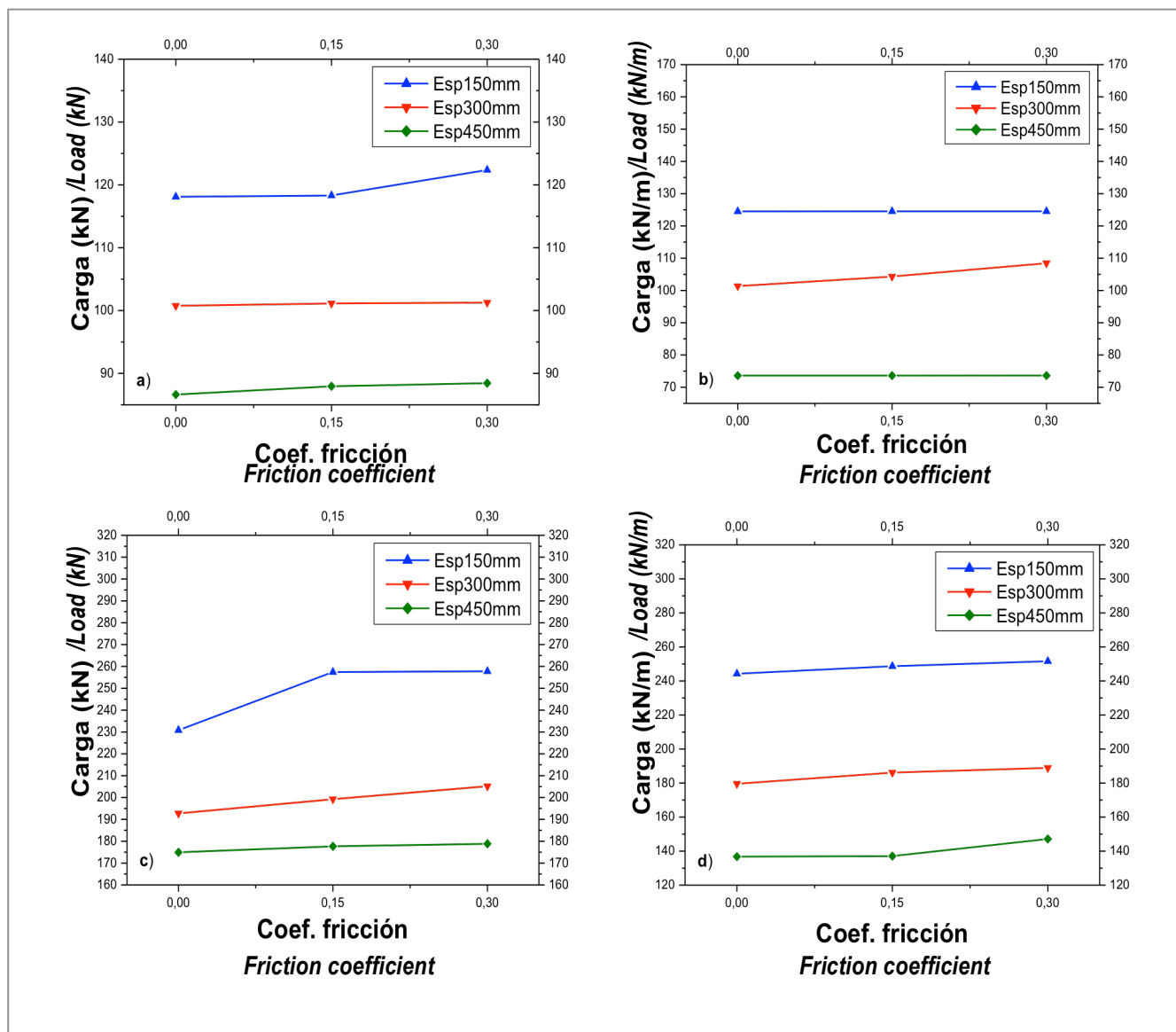


Figura 5. Influencia de la fricción. a) Perfil 127 mm, carga concentrada. b) Perfil 127 mm, carga distribuida, c) Perfil 254 mm, carga concentrada, d) Perfil 254 mm, carga distribuida

Figure 5. Friction influence. a) Structural steel of 127 mm, concentrated load. b) Structural steel of 127 mm, distributed load. c) Structural steel 254 mm, concentrated load. d) Structural steel, distributed load.



Por todo lo anterior se puede plantear que la contribución de la fricción puede ser despreciada de cara a los estudios experimentales, lo cual está en correspondencia con la propuesta del EUROCODE 4 para ensayos push out, que establece la colocación de una película de lubricante en la interface losa-perfil de acero. Otros autores como Lyons et al. (1994) y Rambo-Roddenberry (2002), le confieren importancia a la fricción que se produce en la interface losa-perfil, pues aplican una fuerza normal a la losa en el ensayo push out.

#### 4.3. Separación entre el hormigón y el acero en la interface losa-hormigón

Para analizar la separación que experimenta la interface losa-hormigón se toma una muestra de doce modelos del total. Se realizan cinco mediciones en puntos situados en el centro de la luz de la viga, a tres octavos del apoyo, un cuarto del apoyo, un octavo del apoyo y en un punto cercano al apoyo, dado que en el mismo apoyo la separación resulta igual a cero. (Se hace coincidir las zonas de medición con puntos intermedios entre dos conectores). Las mediciones se realizaron para el 33.3% (1/3), 66.6% (2/3) y 100% del valor de la carga última.

Para las mediciones realizadas en los intervalos de carga del 33.3% y 66.6%, no se observó una gran diferencia en la separación entre los dos materiales en la interfaces losa-perfil, siendo estos valores cercanos a 0.01 mm. Cuando las probetas alcanzaron el 100% de la carga última, se apreció una mayor separación, siendo más significativa en los puntos situados entre un cuarto de la luz de la viga y el apoyo, mientras que en el centro de la luz de la viga la separación fue prácticamente nula.

En los modelos en los cuales se usó un perfil de 127 mm se observó mayor separación que en los modelos donde se usó un perfil de 254 mm, lo cual está dado por la variación en la rigidez. En la medida que se aumentó el espaciamiento entre los conectores, aumentó la separación de la losa, obteniéndose los mayores valores para un espaciamiento entre conectores de 450 mm. Se observa además que en los modelos donde se aplicó carga concentrada la separación fue mayor que en los modelos donde la carga fue distribuida en toda la luz.

*Based on above facts, it is possible to state that friction contribution can be disregarded in the experimental studies, which is consistent with the proposal made by EUROCODE 4 for push out tests; that suggests covering the slab-structural steel interface with a lubricating layer. Other authors, such as Lyons et al. (1994) and Rambo-Roddenberry (2002), highlight the importance that friction produces on the slab-structural steel interface, as they applied a regular stress on the slab during the push out test.*

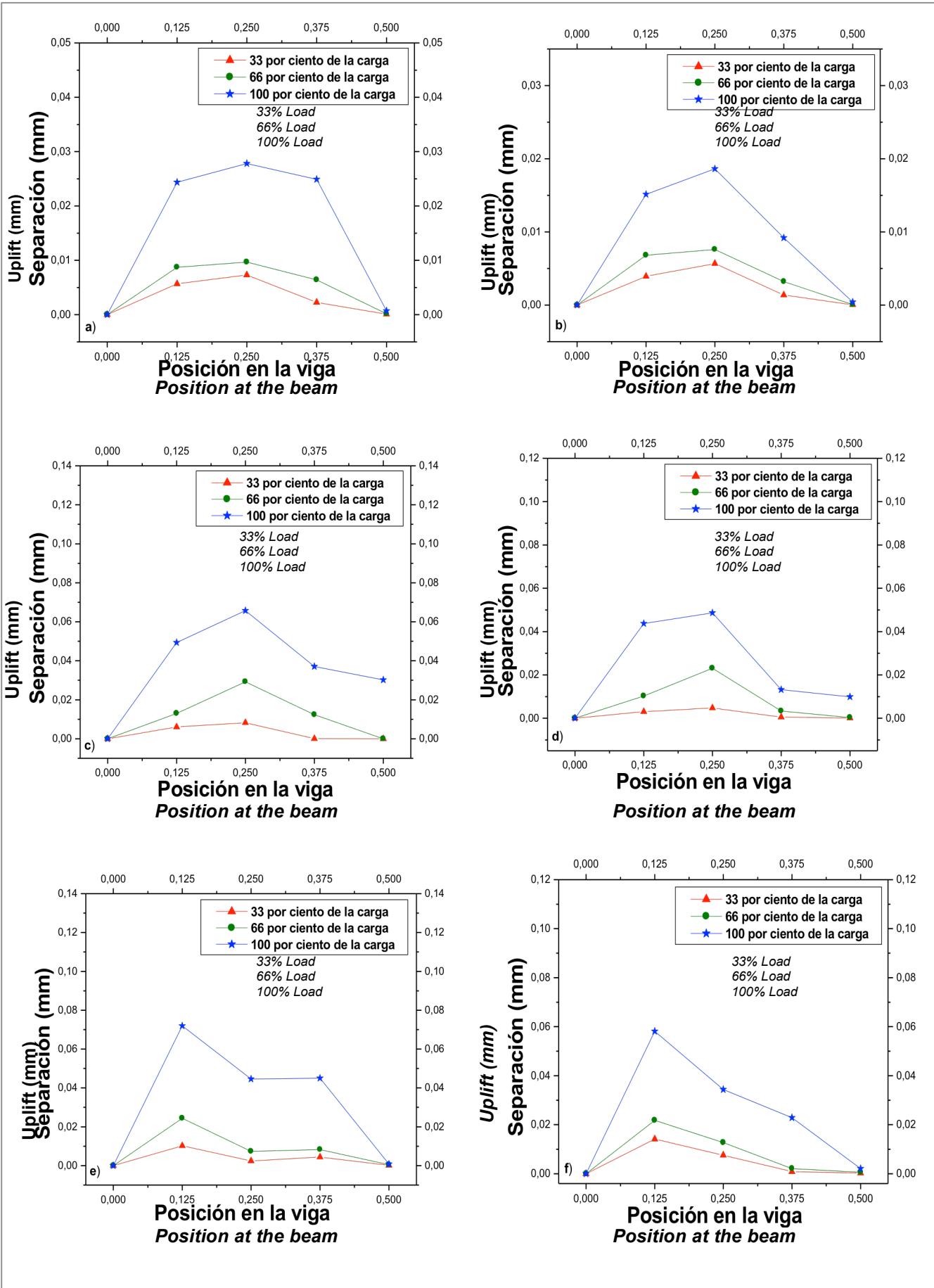
#### 4.3. Spacing between concrete and steel in slab-concrete interface

*In order to analyze the spacing area taking place in the slab-concrete interface, samples are taken from a set of twelve models. Five measurements are carried out at points located at the mid-span slab, at three eighths from support, at one quarter from support, one eighths from support and at a point near the support, since at the same support the resulting spacing area is equal to zero, (measurement areas are made to coincide with intermediate points between two connectors). Measurements were carried out for 33.3% (1/3), 66.6% (2/3) and 100% of ultimate load value.*

*In measurements developed at load intervals of 33.3% and 66.6%, there is no significant spacing difference between the two materials in the interface slab-structural steel interface, being values close to 0.01 mm. When specimens achieved 100% of ultimate load, a higher spacing area was observed, which is greater at the points located between one quarter of the beam span and the support; while at the beam mid-span spacing area was almost null.*

*In models with a 127mm-structural steel, a higher spacing area than in models with 254mm-structural steel was observed, which is explained by stiffness variations. As long as spacing area between connectors was increased, the slab spacing area also increased, yielding higher values among connectors of 450 mm. Besides, it was observed that in models where concentrated load was applied, spacing area was also higher than in those models where load was distributed alongside of the span.*





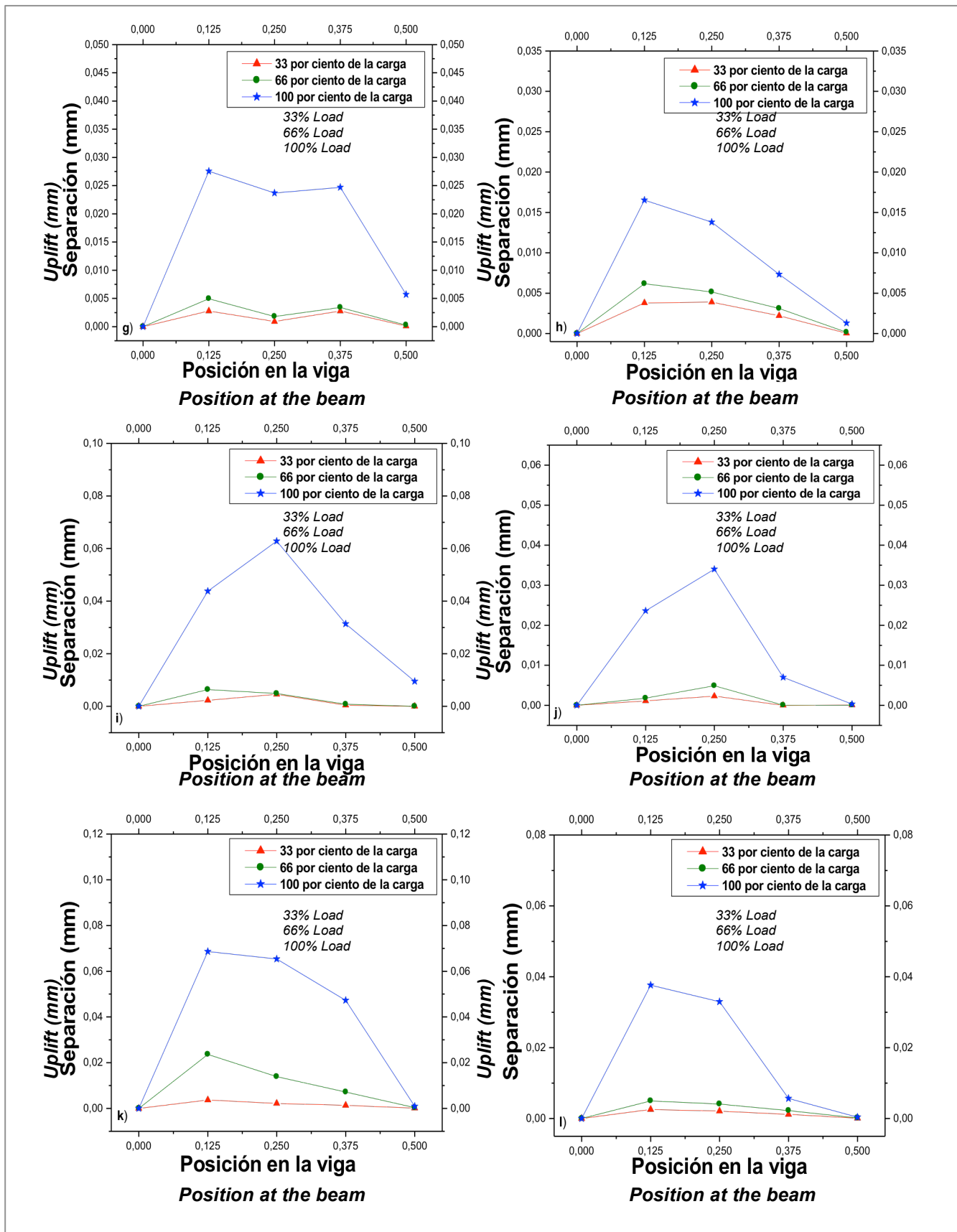


Figura 6. a) Modelo A1-B-C, b) Modelo A1-B-D, c) Modelo A2-B-C, d) Modelo A2-B-D, e) Modelo A3-B-C, f) Modelo A3-B-D, g) modelo B1-B-C, h) modelo B1-B-D, i) modelo B2-B-C, j) Modelo B2-B-D, k) Modelo B3-B-C, l) Modelo B3-B-D  
Figure 6. a) Model A1-B-C, b) Model A1-B-D, c) Model A2-B-C, d) Model A2-B-D, e) Model A3-B-C, f) Model A3-B-D, g) Model B1-B-C, h) Model B1-B-D, i) Model B2-B-C, j) Model B2-B-D, k) Model B3-B-C, l) Model B3-B-D.



En todos los modelos analizados se observó que existe separación en la interfaces losa-perfil, donde los casos más críticos alcanzaron valores cercanos a 0.08 mm.

Finalmente se puede concluir que dada la separación en la interfaces losa-perfil, existe una pérdida de la adherencia en la interfaces, lo que implica una disminución del contacto físico entre los dos materiales y que se pierda cualquier aporte provocado por la fricción, aspecto que corrobora lo planteado en el EUROCODE 4 y en correspondencia con la experimentación.

#### 4.4. Influencia del espaciamiento entre conectadores

En los treinta y seis modelos numéricos analizados se utilizaron tres espaciamientos entre conectadores (150, 300 y 450 mm). En las gráficas (Figura 7), se puede observar la influencia en la capacidad de carga última de la estructura para los diferentes espaciamientos entre conectadores analizados.

Es evidente que al aumentar el espaciamiento entre los conectadores disminuye la capacidad de carga última para la cual se produce el fallo en cada modelo. Esto ocurre tanto para los modelos conformados con los perfiles I de 127 mm de peralte, como para los modelos con los perfiles I de 254 mm de peralte, independientemente del valor del coeficiente de fricción utilizado en el modelo. Se justifica por el despegue que se produce entre la losa y el perfil, el cual aumenta en la medida que se incrementa el espaciamiento entre los conectadores provocando la pérdida de la adherencia entre los materiales (acero y hormigón), aspecto observado y constatado en toda la experimentación precedente del ensayo push out.

Por tanto resulta perjudicial para la viga compuesta utilizar un espaciamiento tan amplio el cual haga que la losa de hormigón y la viga de acero trabajen de forma independiente. Colocar menos conectadores en la sección, provocaría que el esfuerzo transmitido por el hormigón al conectador, así como los esfuerzos que se producen producto al deslizamiento horizontal en la interfase losa-perfil, se distribuyera en menos conectadores por lo cual el esfuerzo a resistir sería mayor en términos de cortante horizontal.

*There is a spacing area in the slab-structural steel interface for all analyzed models. The most critical cases achieved values close to 0.08 mm.*

*Finally, it can be concluded that provided a spacing area in the slab-structural steel interface, there is a bonding loss in the interfaces, which evidences a reduction of physical contact between two materials, thus wasting any contribution provided by friction. This fact proves the statement posed in EUROCODE 4 and is consistent with experimental tests.*

#### 4.4. Influence of spacing area between connectors

*In the thirty six analyzed numerical models, three spacing areas between connectors were used (150, 300 and 450 mm). Charts (Figure 7) show the influence on the ultimate loading capacity at different spacing areas between studied connectors.*

*It is quite clear that when increasing the spacing area among connectors, the ultimate loading capacity decreases, and a failure takes place in each model. This occurs in models with structural steel I of 127 mm height, as well as in models with structural steel I of 254 mm height, independently from the friction coefficient value employed by the model. This is explained by the detachment produced between the slab and the structural steel, which increases as long as spacing area between connectors rises, thus provoking bonding loss between materials (steel and concrete). This aspect was observed and proven during the whole experimental test developed prior to the push out test.*

*Therefore, using a spacing area quite wide, that makes concrete slab and reinforced steel beam work independently from each other, becomes disadvantageous for the composite beam. Placing fewer connectors in this section would make that the stress transmitted by the concrete to the connector (as well as other stresses produced by horizontal displacement in the slab-structural steel interface) would be distributed among fewer connectors, therefore, stress to be endured would be higher in terms of horizontal shear.*



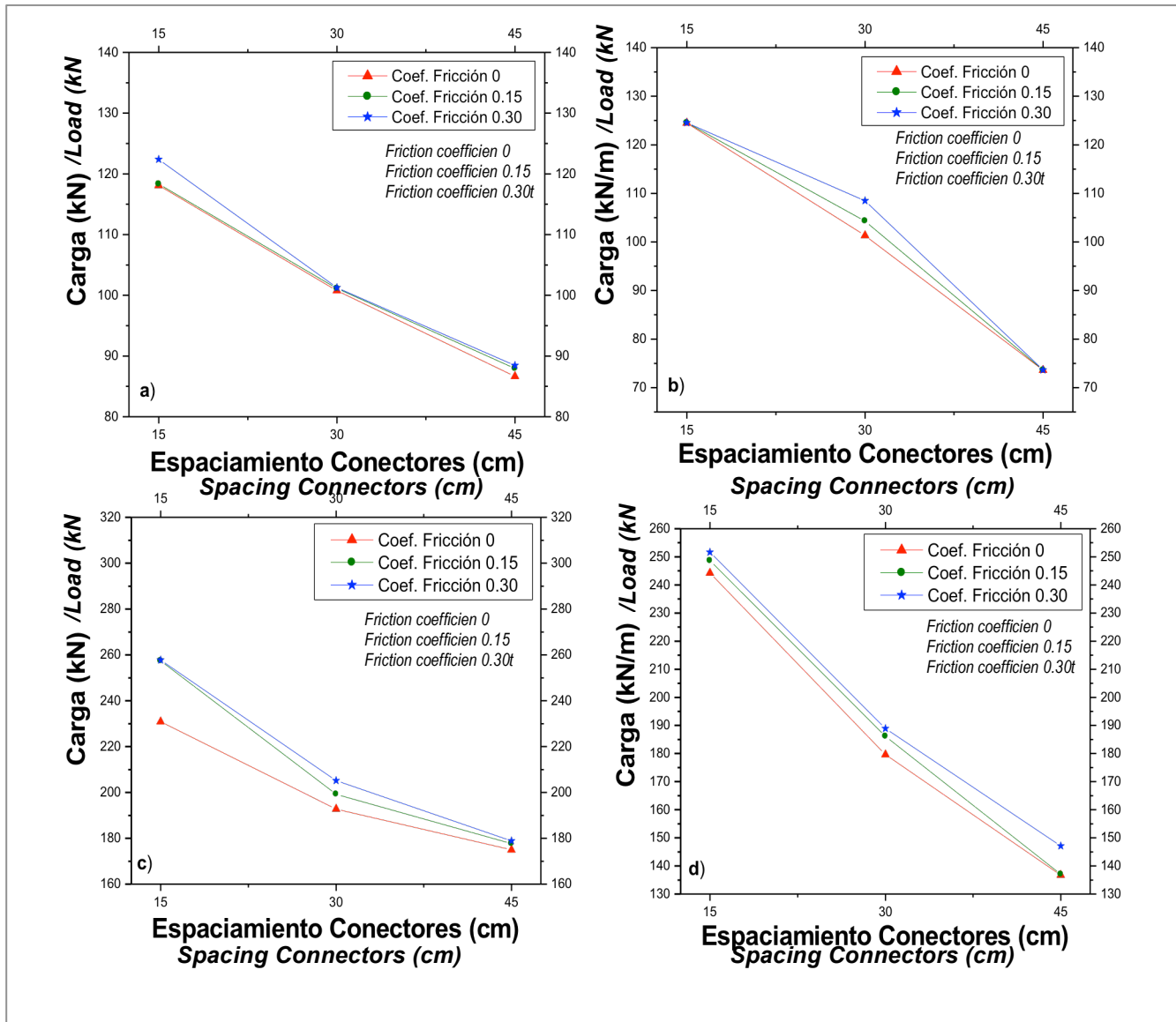


Figura 7. a) Carga concentrada, peralte de 127 mm; b) Carga distribuida, peralte de 127 mm; c) Carga concentrada, peralte de 254 mm; d) Carga distribuida, peralte de 254 mm

Figure 7. a) Concentrate load, 127 mm height; b) Distributed load, 127 mm height; c) Concentrated load, 254 mm height; d) Distributed load 254 mm

Para los modelos analizados con carga concentrada según aumenta el espaciamiento entre los conectadores la carga disminuye en un valor que oscila entre un 15% y un 20%. Mientras que para carga distribuida en la medida que aumenta el espaciamiento entre los conectadores la carga disminuye en un orden cercano al 30%, llegando a ser en algunos casos del 40%.

El análisis efectuado en este epígrafe permite reafirmar que toda contribución a la fricción en la capacidad resistente de una viga compuesta puede ser despreciada, incluso para diferentes espaciamientos entre conectores y que sin duda alguna es necesario determinar un adecuado espaciamiento entre conectadores que posibilite un mejor trabajo conjunto que se traduzca en un favorable comportamiento estructural de la viga compuesta.

For analyzed models with concentrated load, while the spacing area between connectors increases, the load decreases in a value ranging from 15% and 20%. However, in models with distributed load, while the spacing area between connectors increases, load decreases near 30% and, in some cases almost 40%.

The analysis developed by this research allows us to reconfirm that any contribution to friction in the strength capacity of a composite beam can be disregarded, even in different spacing areas between connectors. Undoubtedly, it is necessary to determine a proper spacing area between connectors in order to enable a joint work leading to a favorable structural behavior of a composite beam.



## 5. Conclusiones

- Se ha comprobado la factibilidad de estudiar las estructuras compuestas, en particular el comportamiento estructural de vigas compuestas, a través de la simulación numérica con previa calibración, observándose una buena correspondencia entre los resultados numéricos y los experimentales. Lo anterior permite validar la aplicación del MEF, así como de las consideraciones tomadas en la modelación para el estudio de vigas compuestas.
- Se ha podido constatar que la fuerza de fricción en la interfase losa-perfil no ofrece un aporte significativo en la capacidad resistente de la conexión y a su vez en la capacidad resistente última de la viga compuesta. En correspondencia con el EUROCODE 4, que recomienda colocar una película de grasa en la interfase losa perfil cuando se preparan las probetas para el ensayo push-out.
- En todos los casos estudiados se aprecia un despegue en la interfase losa-perfil, el cual se incrementa en la medida que aumenta el espaciado entre conectores, lo cual hace que se pierda el contacto físico entre las dos superficies y que sea menor la contribución a la capacidad resistente que pudiera aportar la fuerza de fricción.
- Como resultado de este trabajo se puede concluir que la modelación numérica y la experimentación son herramientas de investigación complementarias. Los métodos numéricos brindan soluciones aproximadas a los problemas ingenieriles, por lo que no están exentos de errores, los cuales deben ser controlados con una adecuada calibración a partir de resultados experimentales.

## 5. Conclusions

- *The feasibility of studying composite structures has been proven, particularly the composite beams structural behavior, by employing previously calibrated numerical simulation previously calibrated. An adequate consistency was observed between numerical and experimental results. Consequently, the use of FEM is validated. Modeling considerations for the study of composite beams have been validated as well.*
- *It was possible to prove that friction stress in the slab-structural concrete does not significantly contribute in the connection area's strength capacity and, therefore, in the ultimate strength capacity of the composite beam. The later is in accordance with EUROCODE 4, which recommends covering the slab-structural steel interface with a grease layer, when specimens are prepared for the push-out test.*
- *In all analyzed cases, there is a detachment in the slab-structural steel interface, which is increased as long as spacing area between connectors is also increased, thus provoking a loss of physical contact between the two surfaces. Therefore, the contribution to the strength capacity that might be provided by friction strength is lower.*
- *As a result of this study, it can be concluded that numerical modeling and experimental tests are complementary research tools. Numerical methods deliver approximate solutions for engineering problems. These methods are not exempt from errors; therefore, potential errors might be controlled by means of calibration based on experimental results*

## 6. Referencias/References

- ABAQUS (2003)**, User's Manual, Ver. 6.4-1, Hibbit, Karlson and Sorensen, Inc.
- Bonilla J. (2008)**, Estudio del comportamiento de conectores tipo perno en estructuras compuestas de hormigón y acero mediante modelación numérica. Tesis Doctoral, UCLV, Santa Clara, Cuba, 201 p.
- Bonilla J., Larrúa R., Mirambell E., Recarey C. (2007a)**, Estudio de la influencia de la resistencia del hormigón en el comportamiento de conectores mediante simulación numérica y análisis experimental. , Revista Ingeniería Civil, No 147, CEDEX, Madrid, España, p 57-64.
- Bonilla J., Larrúa R., Mirambell E., Recarey C. (2007b)**, Aplicación de la simulación numérica al estudio del comportamiento de conectores tipo perno en estructuras compuestas de hormigón y acero, Revista Ingeniería Civil, No 148, CEDEX, Madrid, España, p 55-68.
- Bonilla J., Larrúa R., Mirambell E., Recarey C. (2007c)**, Simulación virtual del ensayo push out para conectores tipo perno y con sección en U en estructuras compuestas hormigón-acero, Revista Ingeniería Civil, No 148, CEDEX, Madrid, España, p 83-93.
- Bonilla J., Larrúa R., Recarey C., Mirambell E., Gómez A., López M. (2010)**, Simulación numérica del ensayo push-out para conectores tipo perno de estructuras compuestas en sección viga-losa con lámina nervada, Revista Ingeniería Civil, No 157, CEDEX, Madrid, España, ISSN: 0213-8468, p 109-120.
- Davies C. (1969)**, Test on Half-Scale Steel-Concrete Composite Beams with Welded Stud Connectors. Journal of Structural Engineer, 47 (1), p 29-40.
- Ellobody E. y Young B. (2006)**, Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting. Journal of Constructional Steel Research, 62, p 682-694.
- EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004)**, Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1.1(2004): European Committee for Standardization, Brussels.
- Jayas B. S. y Hosain M. U. (1988)**, Behavior of Headed Studs in Composite Beams: Push-out Test. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol 15, No 2, p 240-253.
- 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 Ellobody E. (2005)**, Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam. Journal of Structural Engineering, 131 (1), p 96-106.





- 
- Larrúa R. (1992)**, Cálculo de estructuras compuestas de hormigón y acero sometidas a flexión bajo carga estática con fundamentación experimental de los conectores. Tesis de Doctorado, ISPJAE, La Habana, Cuba, 180 p.
- Lee J. y Fenves G. L. (1998)**, Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124 (8), p 892-900.
- Lubliner J., Oliver J., Oller S. y Oñate E. (1989)**, A Plastic-Damage Model for Concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25 (3), p 229-326.
- Lyons J. C., Easterling W. S., Murray T. M. (1994)**, Strength of Welded Shear Studs. Report No. CE/VPI-ST 94/07. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Nie J. y Cai C. S. (2004)**, Steel-Concrete Composite Beams Considering Shear Slip Effects. *Journal of Structural Engineering*, 129 (4), p 495-506.
- Oller S. (2001)**, Fractura mecánica. Un enfoque global. Barcelona, España: CIMNE.
- 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 Santaeugenia J. (2005)**, Modelación estocástica de ensayos virtuales de conexiones de secciones compuestas hormigón-acero, *Revista Ingeniería Civil*, No 139, CEDEX, Madrid, España, p 37-48.
- Zienkiewicz O. C. y Taylor R. L. (2004)**, El Método de los Elementos Finitos. (5ta ed. Vol. I, II y III). España: Editorial CIMNE.

