

# Corrección del cálculo de la capacidad resistente última de conectadores tipo perno de estructuras mixtas en la tipología de viga-losa maciza

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

**RESUMEN** En este trabajo se realiza el estudio del comportamiento de conectadores tipo perno de estructuras mixtas de hormigón y acero, en la tipología de viga y losa maciza de hormigón, sometida a flexión bajo carga estática. Para ello se emplea la modelación y la simulación numérica con previa calibración y validación por medio de resultados experimentales. Se realiza un estudio paramétrico para valorar la influencia de los diferentes factores que intervienen en el comportamiento de la conexión, lo cual permite seleccionar las variables que entrarán en juego en la expresión propuesta. Finalmente se logra una nueva formulación que supone un avance significativo con respecto a las existentes en las principales normativas internacionales: **AISC-LRFD (2005)**, **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)**, así como en la normativa cubana **NR 080-2004**, al tomar en consideración nuevos factores. Aspecto que redundará en una mayor precisión en el pronóstico de la capacidad resistente última.

## CORRECTION OF THE CALCULATION OF THE ULTIMATE STRENGTH OF STUDS SHEAR CONNECTORS IN SOLID SLAB COMPOSITE SECTION

**ABSTRACT** *In this work is studied starting from the numeric simulation with previous calibration and validation, the behavior of studs shear connectors of composite structures of concrete and steel formed by beam sections and solid slab of concrete, subjected to flexion under loads static. In such a sense it is carried out a parametric study that allows to value the influence of the different factors that intervene in the behavior of the connection and allow to establish the variables of the proposed formulation, obtaining a procedure enough easy and practical. Finally a new formulation the one is achieved which supposes a significant advance with regard to the existent ones in the main ones normative international: **AISC-LRFD (2005)**, **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)**, as well as the normative cuban **NR 080-2004**, when taking in consideration in the expression new factors, redounding in a bigger precision in the presage of the ultimate strength capacity.*

**Palabras clave:** Estructuras mixtas, Conector, Perno, Simulación numérica, Método de elementos finitos, Capacidad resistente última, Comportamiento.

**Keywords:** Composite structures, Connectors, Stud shear, Numerical simulation, Finite element method, Ultimate strength, Behavior.

## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realiza un estudio del comportamiento de conectadores de estructuras mixtas en la tipología de viga

de acero y losa maciza de hormigón, a través de la simulación virtual del ensayo **push out**, en base a la utilización del Método de Elementos Finitos (MEF), empleando como herramienta numérica el programa computacional **ABAQUS (2003)**. Para la simulación del comportamiento de los materiales se ha empleado: un modelo bilineal con criterio de rotura de Von Mises para el acero y un Modelo de Daño Plástico para el hormigón, donde este último se basa en el criterio de discontinuidad plástica de Mohr-Coulomb Modificado, el cual explica adecuadamente el comportamiento de dicho material [**Lubliner et al. (1989)**, **Oller (2001)**].

En una revisión de los trabajos de varios investigadores, de los que se pueden ejemplificar a: **Jayas y Hosain (1988)**, **Lam y Ellobody (2005)**, se ha comprobado que las expresiones de cálculo de capacidad resistente última vigentes en

(\*) Dr. Ing. Profesor e Investigador. Universidad de Ciego de Avila (UNICA). Carretera a Morón km 9 1/2, Ciego de Avila, Cuba.

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

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

(\*\*\*\*) Dr. Ing. Catedrático de Universidad e Investigador. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España.

las principales normativas internacionales, **AISC-LRFD (2005)** y **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)**, así como en la normativa cubana vigente **NR 080-2004**, sobreestiman dicho valor (capacidad resistente última<sup>1</sup>), existiendo posibilidades de perfeccionamiento de las mismas. Por ello se realizan varias modificaciones, que redundarán en una mayor precisión en el pronóstico. Como un primer elemento se encuentra el mejoramiento de la concepción del coeficiente alfa ( $\alpha$ ) establecido en **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)** para la reducción de la capacidad resistente de la conexión al emplearse conectadores cortos, con baja relación altura-diámetro ( $h_c/d$ ). Por otra parte, tomando en cuenta los señalamientos de **Jayas y Hosain (1988)**, se introduce en las ecuaciones un nuevo coeficiente que considera el espaciamiento longitudinal de los conectadores. Finalmente, a partir de los estudios de **Lam y Ellobody (2005)** que sirvieron de punto de partida y reflexión, se hacen modificaciones a las expresiones existentes y se definen nuevas propuestas para mejorar la exactitud en el pronóstico al usar diámetros superiores a 19.05 mm (3/4 in).

Se han empleado diseños de experimentos factoriales para combinar racionalmente los parámetros de mayor influencia en la capacidad resistente de la conexión, constituyendo las variables de entrada de los modelos numéricos previamente calibrados a partir de experimentos reales. Con ayuda de la simulación se resuelve el modelo para las diferentes combinaciones del diseño experimental y se conforma una base de datos (muestra) que es procesada estadísticamente mediante análisis de regresión, llegando finalmente a las nuevas ecuaciones de cálculo. Este enfoque evidencia el importante rol que desempeña la trilogía formada por la modelación, la estadística y la experimentación.

## 2. ESTADO ACTUAL DEL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD RESISTENTE ÚLTIMA

En el presente epígrafe se realiza un análisis crítico de las expresiones de predicción de la capacidad resistente última de conectadores tipo perno en la tipología formada por viga de acero y losa maciza, que están vigentes en las principales normativas internacionales: **AISC-LRFD (2005)**, **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)**, así como en la normativa cubana **NR 080-2004**.

### 2.1. EXPRESIONES DE CÁLCULO SEGÚN LA AISC-LRFD

La **AISC-LRFD (2005)** establece para el cálculo de capacidad resistente última de la conexión la expresión (1), la cual es aplicable a sección mixta formada por losa maciza y la formada por losa en presencia de lámina nervada (steel deck).

$$Q_{sc} = 0.5 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c} \leq R_g \cdot R_p \cdot A_{sc} \cdot F_u \quad (1)$$

Donde:

$A_{sc}$  es el área de la sección transversal del conectador en ( $\text{in}^2$ ).

$f'_c$  la resistencia especificada del hormigón a compresión en (ksi).

$E_c$  el módulo de elasticidad del hormigón en (ksi).

$F_u$  la resistencia mínima especificada del conectador a tracción en (ksi).

Al emplearse la expresión (1) para el cálculo en sección mixta formada por losa maciza, los coeficientes  $R_g$  y  $R_p$  toman el valor de uno, adoptando la expresión la forma de la ecuación (2), donde mayoritariamente prevalece el miembro izquierdo, siendo este el modelo de **Ollgaard et al. (1971)**.

$$Q_{sc} = 0.5 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c} \leq A_{sc} \cdot F_u \quad (2)$$

La expresión (2) tiene varios inconvenientes. Uno de ellos es que arroja valores sobreestimados de capacidad resistente última para todos los diámetros de conectadores de la gama comercial [**Lam y Ellobody (2005)**]. Un segundo elemento es que limita su uso a conectadores donde la altura es mayor o igual a cuatro veces su diámetro, lo que impide la utilización de pernos relativamente cortos. Como un último aspecto, se observa que no toma en consideración la reducción de la capacidad resistente en función del espaciamiento longitudinal de los conectadores, o sea, para los casos en que exista superposición de los estados tensionales (en el hormigón) de conectadores próximos. Solo se limita como especificación que el espaciamiento longitudinal no sea inferior a un valor mínimo, en este caso seis veces el diámetro (6d) [**Jayas y Hosain (1988)**]. Además, se hace necesario comentar que el espaciamiento longitudinal mínimo planteado por dicha normativa debe ser variable y no una magnitud constante como lo establece, pues depende de la resistencia del hormigón entre otros factores. Aspecto que se verá más adelante. Por otra parte, se ha comprobado por investigaciones experimentales de **Jayas y Hosain (1988)**, que el espaciamiento longitudinal mínimo (para que no exista reducción de la capacidad resistente por la proximidad de los conectadores) debe ser superior a 6d.

### 2.2. EXPRESIONES DE CÁLCULO SEGÚN EUROCODE 4

**Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)** establece la expresión (3) para el cálculo de capacidad resistente última de conectadores en sección mixta formada por losa maciza.

$$Q_{sc} = 0.37 \cdot \alpha \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c} \leq 0.8 \cdot A_{sc} \cdot f_u \quad (3)$$

En este caso el valor de  $\alpha$  se determina a partir de:

$$\alpha = 0.2 \cdot \left( \frac{h_c}{d} + 1 \right) \quad \text{para} \quad 3 \leq \frac{h_c}{d} \leq 4$$

y

$$\alpha = 1 \quad \text{para} \quad \frac{h_c}{d} > 4$$

En las expresiones anteriores las variables:

$A_{sc}$  es el área de la sección transversal del conectador en ( $\text{m}^2$ ).

$f_{ck}$  la resistencia característica del hormigón a compresión en (MPa).

$E_c$  el módulo de elasticidad del hormigón en (MPa).

$f_u$  la resistencia última especificada del conectador a tracción en (MPa).

$h_c$  la altura del conectador en (m).

$d$  el diámetro del conectador en (m).

La expresión (3) realiza una adecuada predicción en el caso de conectadores donde se cumple la relación [ $(h_c/d) > 4$ ], así como en los casos en que existe una separación longitudinal que no provoque la superposición de los estados tensionales (en el hormigón) generados por conectadores vecinos. Sin embargo, cumpliéndose las condiciones anteriores para los diámetros de 22.2 y 25.4 mm, se sobreestima la capacidad resistente última de la conexión. Este planteamiento es consecuente con lo expresado en los trabajos de **Lam y Ellobody (2005)**.

<sup>1</sup> **Capacidad resistente última:** En todo el documento este término no incluye Teoría de Seguridad, Estados Límites, es decir, no se consideran coeficientes para tomar los efectos de incertidumbre u otros relacionados con coeficientes adicionales en el diseño.

La expresión (3) toma en cuenta a través del coeficiente ( $\alpha$ ) la reducción de la capacidad resistente para conectadores que cumplen  $[3 \leq (h_c/d) \leq 4]$ , aspecto que no es considerado en el resto de las normativas estudiadas. No obstante, dicho coeficiente tiene la limitante de que solo es función de la relación geométrica ( $h_c/d$ ) y no de otros parámetros como la resistencia del hormigón a la compresión.

**Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)** limita el espaciamiento longitudinal mínimo a cinco veces el diámetro ( $5d$ ) y carece del mismo modo que la **AISC-LRFD (2005)** de un coeficiente para la reducción de la capacidad resistente en función del espaciamiento longitudinal, por lo que resultan válidas en este caso el resto de las observaciones hechas a la **AISC-LRFD (2005)** en tal sentido y coherente con las investigaciones de **Jayas y Hosain (1988)**.

### 2.3. EXPRESIONES DE CÁLCULO SEGÚN LA NORMATIVA CUBANA

La **NR 080-2004** establece para el cálculo en sección mixta formada por losa maciza de hormigón el menor valor de capacidad resistente última derivado de las expresiones (4) y (5).

$$Q_{sc} = 0.5 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{R'_{bk} \cdot E_c} \quad (4)$$

$$Q_{sc} = A_{sc} \cdot R_{pk} \quad (5)$$

Donde:

$A_{sc}$  es el área de la sección transversal del conectador en ( $m^2$ ).

$R'_{bk}$  la resistencia característica del hormigón a compresión en (MPa).

$E_c$  el módulo de elasticidad del hormigón en (MPa).

$R_{pk}$  la resistencia característica del conectador a tracción en (MPa).

Las expresiones (4) y (5), son similares a la expresión (2), establecida en la **AISC-LRFD (2005)**. Lo cual hacen válidos, para la **NR 080-2004**, los señalamientos hechos con anterioridad a la **AISC-LRFD (2005)**. Finalmente se puede concluir que la normativa **NR 080-2004**, sobreestima la capacidad resistente de las conexiones para todos los diámetros de la gama comercial. No considera la influencia del espaciamiento longitudinal de los conectadores y no reduce la capacidad resistente para conectadores relativamente cortos.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL ESPÉCIMEN

El estudio del comportamiento de la conexión se ha realizado en base a la simulación virtual del ensayo **push out**. Las características de la probeta objeto de estudio están en correspondencia con **CP 117 (BSI 1965) [Lam y Ellobody (2005)]**, sólo que en este caso se ha colocado un conectador a cada lado del perfil. Dicha probeta se compone de un segmento de perfil **W10 x 49** y dos losas rectangulares de hormigón construidas una a cada lado del mismo en contacto con las alas.

La conexión entre la losa y el perfil se logra mediante un perno de  $19.05 \times 100$  mm, con resistencia última a tracción de 470.8 MPa y módulo de deformación de 200000 MPa que se suelda a aquél y a la vez queda embebido en la losa de hormigón de dimensiones  $619 \times 469 \times 150$  mm (largo x ancho x espesor). El procedimiento de ensayo y preparación de la probeta fue realizado acorde con lo planteado en **Eurocode 4 [Lam y Ellobody (2005)]** (ver figura 1).

Todo el proceso metodológico de modelación, calibración y validación del modelo numérico, que comprende: definición de las condiciones de borde, selección del tipo de elemento finito y selección de la densidad de malla óptima fue tratado en un trabajo previo, publicado en el número 148 de la Revista Ingeniería Civil, bajo el título "Aplicación de la simulación numérica al estudio del comportamiento de conectadores tipo perno en estructuras mixtas de hormigón y acero" **[Bonilla et al. (2007b)]**, por ello no ha sido abordado nuevamente.

### 4. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN EN LA CAPACIDAD RESISTENTE ÚLTIMA DE LA CONEXIÓN

La resistencia del hormigón<sup>2</sup> a la compresión ( $R'_b$ ) constituye un factor de interés en el comportamiento de la conexión. Su influencia se muestra a través de un estudio realizado numéricamente con su correspondiente validación experimental. En trabajos de **Bonilla et al. (2007a)** se simula numéricamente la probeta de los experimentos de **Lam y Ellobody**

2 La resistencia de los materiales, en este caso del hormigón ( $R'_b$ ) y del acero ( $R_a$ ) se refiere a: valores medios cuando son tomados de resultados experimentales y a valores prefijados cuando se refiere a la simulación numérica, donde en estos últimos no existe dispersión. No se refiere a valores normativos de diseño.

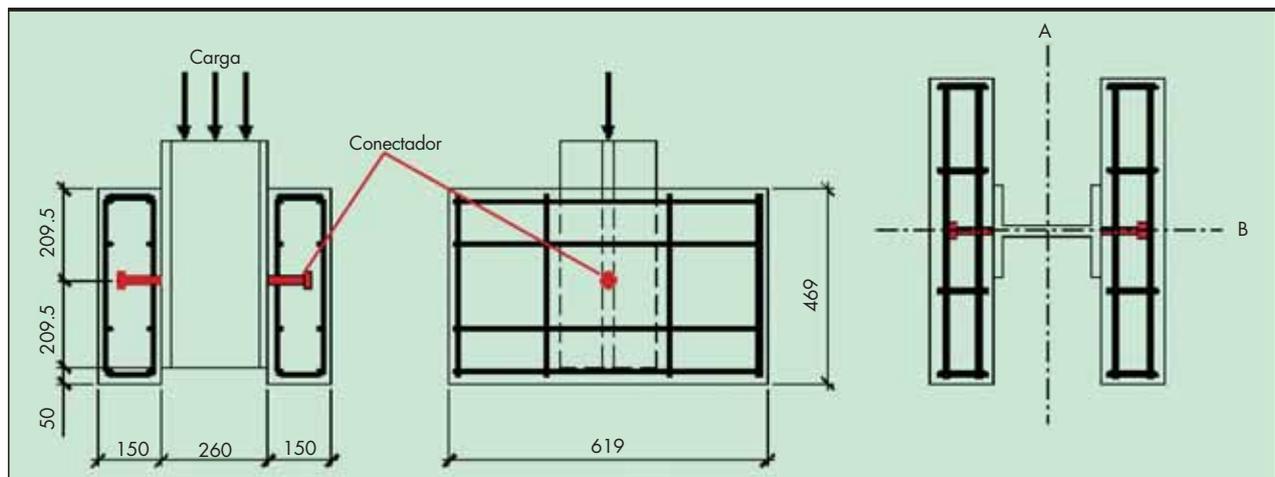


FIGURA 1. Esquema de la probeta ensayada por **Lam y Ellobody (2005)**.

Espécimen	Dim. perno (mm)	R' <sub>b</sub> (MPa)	Q <sub>sc-exp</sub> (kN)	Q <sub>sc-MEF MBL</sub> (kN)	Q <sub>sc-MEF MDP</sub> (kN)
SP-2	19.05 x 100	20	71.60	72.25	71.85
SP-3	19.05 x 100	30	93.00	88.10	88.58
SP-4	19.05 x 100	35	102.00	94.40	98.50

**Nota:** La tabla muestra la capacidad resistente para un conector.

**TABLA 1.** Influencia de la resistencia del hormigón en la capacidad resistente de la conexión.

(2005), donde se han considerado resistencias del hormigón de 20, 30 y 35 MPa (ver tabla 1).

Con el término ( $Q_{sc-MEF MBL}$ ) se indica la capacidad de carga obtenida en el modelo numérico, considerando un comportamiento bilineal para el hormigón. El término ( $Q_{sc-MEF MDP}$ ) indica del mismo modo la capacidad de carga teniendo en cuenta el Modelo de Daño Plástico para el hormigón. Manteniendo constante el resto de las propiedades físico-mecánicas y solo variando la resistencia del hormigón, es notable en la tabla 1 como al incrementarse esta, aumenta la capacidad resistente de la conexión.

Estudios posteriores realizados en la presente investigación, donde intervienen una amplia gama de conectadores, han permitido corroborar lo planteado con anterioridad y profundizar además, acerca de la influencia de la resistencia del hormigón en el comportamiento de la conexión.

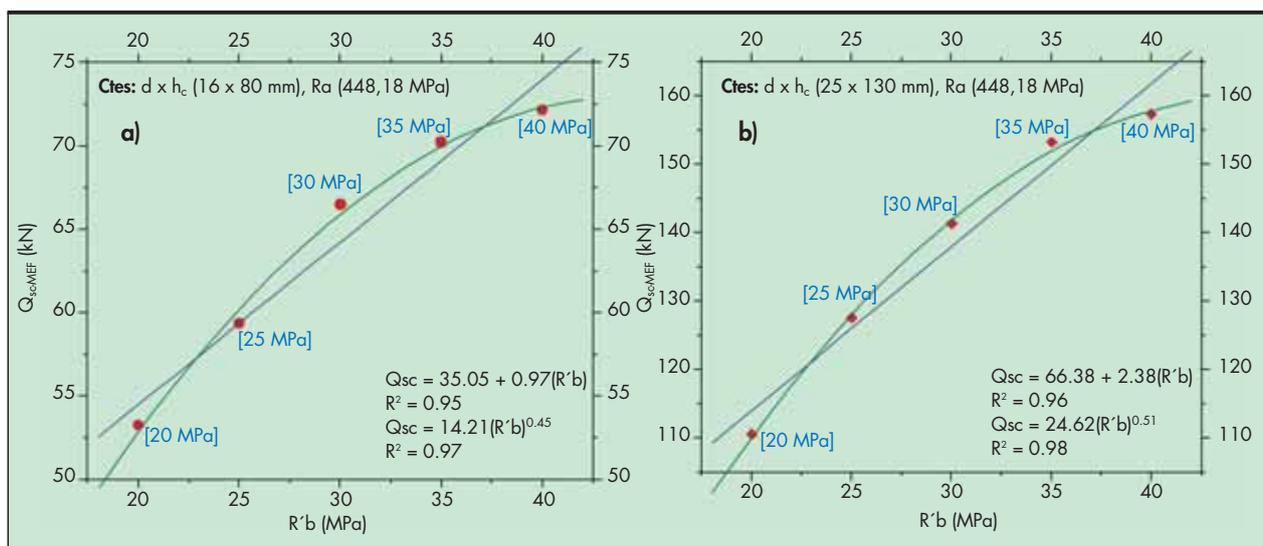
En la figura 2 se muestran resultados derivados de la simulación numérica, donde de manera gráfica, se observa como evoluciona la capacidad resistente de la conexión al incrementarse la resistencia del hormigón. Para ello han sido tomados dos diámetros de conectadores: 15.88 y 25.40 mm. Se han realizado modelos de regresión lineal y no lineal, con el objetivo de evaluar a cual se ajusta más la capacidad de resistente de la conexión al variar la resistencia del hormigón. Es notable como para ambos casos el ajuste no lineal es superior al lineal, al presentar un  $R^2$  (coeficiente de determinación) mayor. El comportamiento geométrico de los modelos se puede observar en la figura 2 (a) y (b) respectivamente. En el ajuste no lineal

llama la atención, como la relación funcional entre ambas variables está en correspondencia con el modelo propuesto por Ollgaard et al. (1971) (ver tabla 10).

## 5. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CONECTOR Y LA RESISTENCIA DEL ACERO EN LA CAPACIDAD RESISTENTE ÚLTIMA DE LA CONEXIÓN

En las expresiones de cálculo de las normativas estudiadas, el área de la sección transversal del vástago es una variable que está presente. En la figura 3 se observa, a partir de probetas estudiadas por medio de métodos numéricos, como al incrementarse la sección del perno aumenta significativamente la capacidad resistente última, mostrando una tendencia lineal en todo el dominio de variación del diámetro (12.70-25.40 mm), el cual está estrechamente ligado a dicha variable (área transversal). Para corroborar esta afirmación se han realizado ajustes de tipo lineal y no lineal, donde son significativamente superiores los coeficientes de determinación de los modelos lineales respecto a los no lineales (ver figura 3).

La tabla 2 resume para el diámetro de 22.22 mm, la influencia de la resistencia última del acero del conector a tracción ( $R_a$ ) en la capacidad resistente, en un rango comprendido entre 448.18 y 551.60 MPa. Al aumentar dicho parámetro se manifiesta, a diferencia de la sección transversal, un incremento menos significativo en la capacidad resistente última de la conexión.



**FIGURA 2.** Influencia de la resistencia del hormigón: a) Conector de 15.88 mm, b) Conector de 25.40 mm.

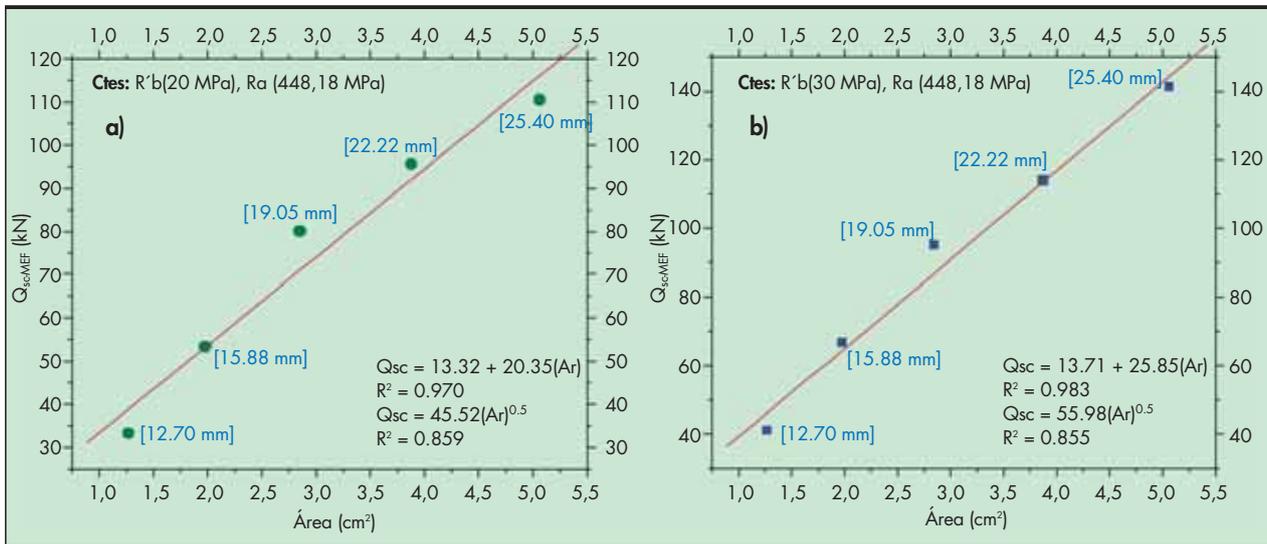


FIGURA 3. Influencia del área del vástago del conector en la capacidad resistente: a) Para R'<sub>b</sub> de 20 MPa, b) Para R'<sub>b</sub> de 30 MPa.

### 6. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN ALTA-DIÁMETRO DEL CONECTOR EN LA CAPACIDAD RESISTENTE ÚLTIMA DE LA CONEXIÓN

La normativa ramal cubana vigente **NR 080-2004**, así como la **AISC-LRFD (2005)**, carecen en su expresión para predecir la capacidad resistente de la conexión, de un término que tenga en cuenta la relación altura/diámetro del conector (h<sub>c</sub>/d). Se aclara que la altura del conector es medida, después de ser soldado, desde el perfil hasta la parte superior de la cabeza.

**Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)** presenta un coeficiente α para tomar en consideración la variación de la relación [3 ≤ (h<sub>c</sub>/d) ≤ 4], que solo es función de dicha relación geométrica y no de propiedades físicas como la resistencia de los materiales, constituyendo una limitante en la expresión de esta normativa como se verá más adelante.

En la figura 4 se muestran los resultados derivados de la simulación numérica, donde se aprecia el comportamiento de la capacidad resistente de conectores al variar la relación (h<sub>c</sub>/d). Se han utilizado en los modelos virtuales los diámetros inferior y superior de la gama comercial, o sea, 9.52 y 25.40 mm, así como 19.05 mm por ser este último de los más usados.

La relación (h<sub>c</sub>/d) para la que se alcanza la máxima capacidad resistente es variable, dependiendo de la resistencia del hormigón y del diámetro del conector (ver figura 4). Por otra parte, el incremento de la capacidad resistente al aumentar (h<sub>c</sub>/d) tiene una tendencia lineal.

Para valorar la influencia de la resistencia del acero en la evolución de la capacidad resistente última al variar (h<sub>c</sub>/d) se ha realizado un estudio considerando valores de 448.18 (65) y 551.60 (80) MPa (ksi), cuyos resultados se muestran en la figura 4 (a) y (b). Se puede observar como la relación (h<sub>c</sub>/d) donde ocurre la inflexión o punto a partir del cual la capacidad resistente tiene un comportamiento asintótico es el mismo para ambos casos (4.19, 3.67, 3.14). La diferencia radica en la pendiente ascendente que se describe para (h<sub>c</sub>/d), comprendida entre 2.62 y los puntos de inflexión, que es ligeramente mayor para la resistencia del acero de 551.60 MPa, teniendo además un rango de variación de la capacidad de carga mayor, lo que hace este caso más desfavorable a la hora de expresar cada punto de esta curva como una fracción del máximo valor resistente del conector.

Como se ha podido ver, la influencia del acero es poco significativa, aunque el estudio se ha realizado finalmente en el resto de los diámetros con resistencias de 551.60 MPa por constituir el caso más desfavorable según el análisis previo, por ello el coeficiente de reducción se determina para cada diámetro de conector teniendo en cuenta la variación de la resistencia del hormigón (20, 30 y 40 MPa) y una resistencia del acero de 551.60 MPa. El procedimiento seguido para determinar dicho coeficiente consiste en expresar los valores de capacidad de carga de los puntos de la pendiente ascendente, como una fracción de la máxima capacidad de carga (mayor capacidad de carga en cada curva). Para fijar el valor máximo de la carga resistente se ha calculado el va-

Ø (mm)	R' <sub>b</sub> (MPa)	R <sub>a</sub> (MPa)	Q <sub>sc-MEF</sub> (kN)
22.2	20	448.18	95.68
		499.88	99.14
		551.60	101.77
	30	448.18	113.85
		499.88	119.24
		551.60	131.28

TABLA 2. Influencia de la resistencia del acero en la capacidad resistente de la conexión.

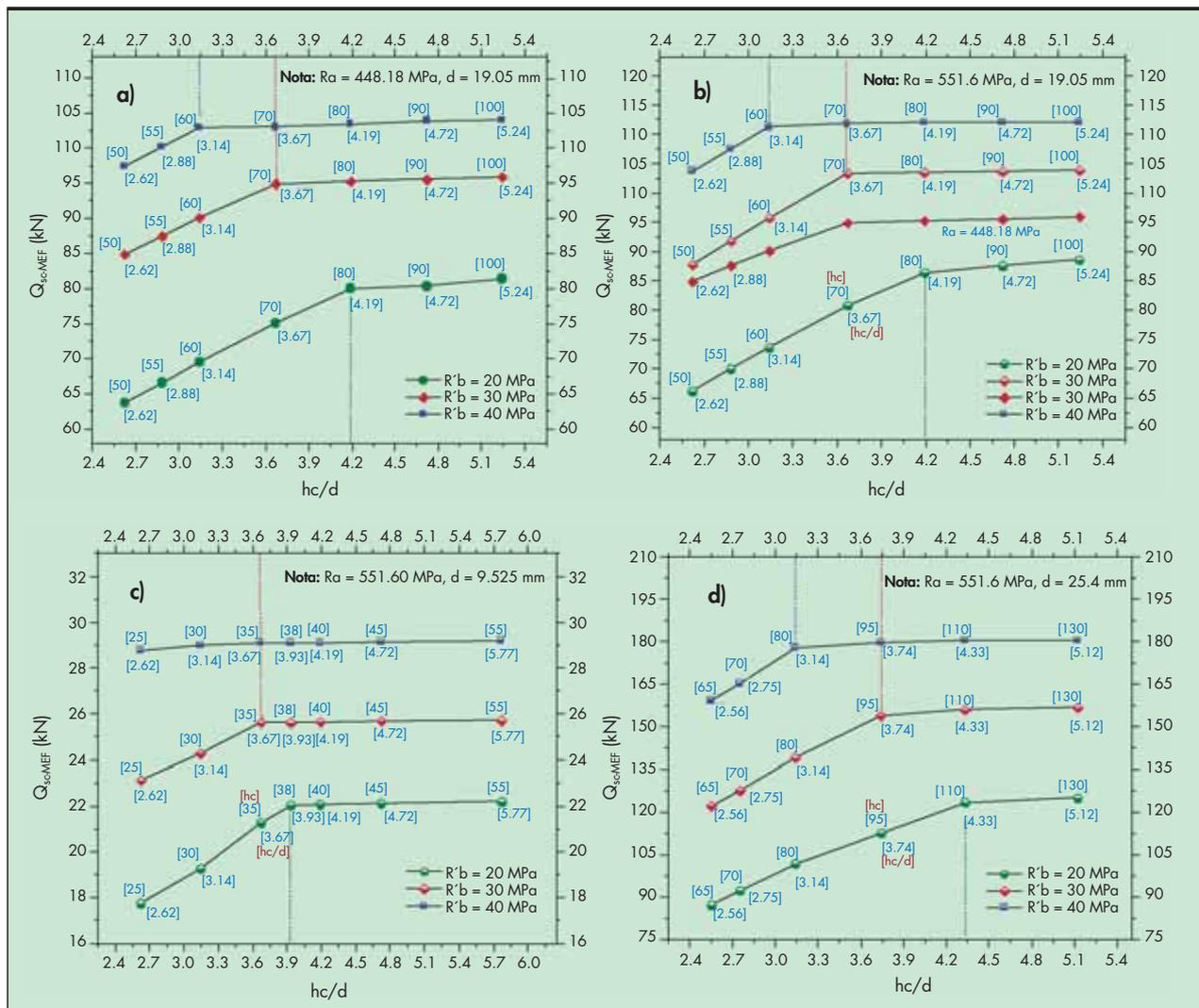


FIGURA 4. Influencia de la relación ( $h_c/d$ ) en la capacidad resistente para conectadores de: a) y b) 19.05 mm; c) 9.52 mm; d) 25.40 mm.

lor medio de los puntos donde la pendiente tiende a cero. Después de expresar la capacidad de carga para cada relación ( $h_c/d$ ), como una fracción de la mayor capacidad de carga se construyeron modelos de regresión lineales.

A modo de ejemplo se han presentado en la figura 5 (a) y (b) los modelos de regresión para el conectador de 19.05 mm y resistencias del hormigón de 20 y 30 MPa respectivamente. Conjuntamente se brindan en los gráficos, la ecuación de regresión y el coeficiente  $R^2$ .

En la tabla 3 se pueden ver las ecuaciones de regresión para el resto de los diámetros estudiados y resistencias del hormigón.

Al evaluar la relación ( $h_c/d$ ) deseada en cada una de las expresiones de regresión se obtienen los coeficientes de reducción  $\alpha$  para cada diámetro de conectador y resistencia de hormigón. En la tabla 4 se brindan explícitamente los valores de dicho coeficiente.

Los coeficientes de reducción, al variar el diámetro para cada una de las relaciones ( $h_c/d$ ), tienen un comportamiento con tendencia a lineal. Dicho aspecto es mostrado a través de dos ejemplos seleccionados de relaciones ( $h_c/d$ ) de 2.6 y 3.6 para resistencia del hormigón de 20 MPa (ver figura 6).

El comportamiento anteriormente mostrado, permite determinar los coeficientes de los diámetros intermedios (12.70, 15.88 y 22.22 mm) mediante ajustes lineales para cada una de las relaciones ( $h_c/d$ ) y resistencias de hormigón en cada caso. Con esto se logra una adecuada aproximación y se evita el incremento de la realización de costosos modelos numéricos desde la óptica computacional.

Al comparar el coeficiente derivado de la expresión de Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004), que aparece al final de la tabla 4, con los propuestos se observa una considerable diferencia, que en algunos casos supera el 25%.

## 7. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO LONGITUDINAL EN LA CAPACIDAD RESISTENTE ÚLTIMA DE LA CONEXIÓN

La colocación de los conectadores a un espaciamiento relativamente reducido puede provocar en la masa de hormigón, una superposición de las superficies de falla de los conectadores vecinos, haciendo que se reduzca de manera considerable la capacidad resistente. **Jayas y Hosain (1988)** estudiaron el comportamiento de conectadores de 15.88 mm al variar su es-

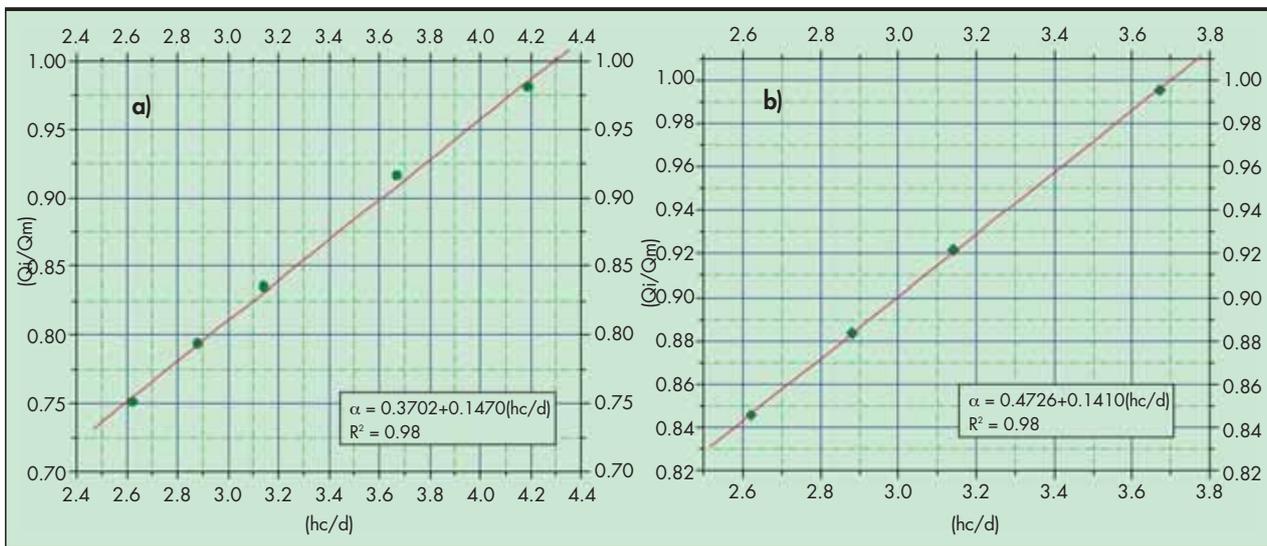


FIGURA 5. Modelos de regresión para conector de 19.05 mm: a)  $R'_b = 20$  MPa; b)  $R'_b = 30$  MPa.

paciamiento longitudinal para los siguientes valores: 306 mm (19d) [similar al utilizado por **Ollgaard et al. (1971)**], 153 mm (9d) y 102 mm (6.42d). Al variar primeramente el espaciamiento de 19d a 9d, se aprecia una disminución de la capacidad resistente en el orden del 4% y a su vez, al reducir el espaciamiento de 9d a 6.42d se observa una reducción de aproximadamente el 8%. Estos resultados no están en total correspondencia con las recomendaciones de espaciamiento longitudinal mínimo propuesto por las principales normativas internacionales vigentes, o sea, 5d por **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)** y 6d por la **AISC-LRFD (2005)** y por tanto, son indicativos de que el 100% de la capacidad resistente no se alcanza para estos espaciamientos.

En la presente investigación se han estudiado conectadores de 9.52, 19.05 y 25.40 mm considerando diferentes valores de resistencias de hormigón (20, 30 y 40 MPa). En la figura 7 se puede apreciar la configuración de la probeta utilizada, donde se han colocado sobre el eje de la viga cuatro conectadores a cada lado, con un espaciamiento variable, que puede ser 3d, 5d, 7d, 9d, 11d, 15d, 21d, 25d y 27d respectivamente.

En la figura 8 se muestra gráficamente la evolución de la capacidad resistente a medida que se incrementa el espaciamiento longitudinal desde 3d hasta 27d. En correspondencia con las investigaciones de **Davies (1967)**, así como **Hawkins y Mitchell (1984)**, es notable como al incrementarse el espaciamiento por encima de 5d, la curva tiene una tendencia li-

neal con pendiente ascendente hasta llegar a valores donde la capacidad de carga tiene un comportamiento asintótico. El valor de espaciamiento donde se produce la inflexión, que es además a partir de donde la pendiente de la curva comienza a hacerse cero, es variable, pues depende de la resistencia del hormigón e incluso del diámetro del conector.

Para valores de espaciamiento inferiores a 5d ocurre, en algunos casos, una caída brusca de la capacidad de carga, por lo que se recomienda no espaciar los conectadores a valores inferiores a este. Es recomendable considerar espaciamientos por encima de 5d, con la reducción de la capacidad de carga correspondiente, siempre que sea necesario.

Del mismo modo que en el estudio anterior, para evaluar la influencia de la relación  $(h_c/d)$ , se han realizado modelos de regresión lineal para cada diámetro estudiado, teniendo en cuenta las resistencias del hormigón consideradas. Para determinar dichos modelos, se han expresado los puntos entre 5d y el punto de inflexión donde comienza la tendencia asintótica para la capacidad de carga, como una fracción de la mayor capacidad de carga. Determinada esta última como el valor medio de los puntos para los cuales la capacidad de carga presenta un comportamiento regularmente estable.

Con el objetivo de evaluar la influencia de la resistencia del acero se han estudiado conectadores con valores de 448.18 y 551.60 MPa respectivamente. En la figura 8 (a) y (b) se muestra el estudio usando primeramente resistencias de 448.18 MPa (a)

TABLA 3. Modelos de regresión.

d (mm)	$R'_b$ (MPa)	Expresión del Ajuste	$R^2$	d (mm)	$R'_b$ (MPa)	Expresión del Ajuste	$R^2$
9.52	20	$0.402+0.151(h_c/d)$	0.99	25.40	20	$0.296+0.162(h_c/d)$	0.99
	30	$0.657+0.092(h_c/d)$	0.99		30	$0.347+0.171(h_c/d)$	0.99
	40	–	–		40	$0.373+0.195(h_c/d)$	0.99
19.05	20	$0.370+0.147(h_c/d)$	0.98				
	30	$0.473+0.141(h_c/d)$	0.98				
	40	$0.591+0.128(h_c/d)$	0.99				

Alfa		h <sub>c</sub> /d									
d (mm)	R' <sub>b</sub> (MPa)	2.6	2.8	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4	4.2	4.4
9.52	20	0.795	0.825	0.855	0.885	0.915	0.946	0.976	1	1	1
	30	0.896	0.915	0.933	0.951	0.970	1	1	1	1	1
	40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12.70	20	0.779	0.810	0.840	0.871	0.900	0.930	0.961	0.986	0.995	1
	30	0.877	0.899	0.920	0.941	0.964	0.993	1	1	1	1
	40	0.975	0.983	0.992	1	1	1	1	1	1	1
15.88	20	0.764	0.795	0.826	0.856	0.886	0.917	0.947	0.974	0.990	1
	30	0.856	0.881	0.906	0.930	0.955	0.986	1	1	1	1
	40	0.951	0.967	0.983	1	1	1	1	1	1	1
19.05	20	0.752	0.782	0.811	0.841	0.870	0.899	0.929	0.958	0.987	1
	30	0.840	0.868	0.896	0.924	0.952	0.980	1	1	1	1
	40	0.924	0.949	0.975	1	1	1	1	1	1	1
22.22	20	0.732	0.765	0.796	0.828	0.859	0.889	0.921	0.952	0.981	1
	30	0.815	0.846	0.877	0.908	0.939	0.971	1	1	1	1
	40	0.901	0.934	0.967	1	1	1	1	1	1	1
25.40	20	0.717	0.749	0.782	0.814	0.847	0.879	0.912	0.944	0.976	1
	30	0.792	0.826	0.860	0.894	0.928	0.963	0.997	1	1	1
	40	0.880	0.919	0.958	0.997	1	1	1	1	1	1
EUROCODE-4		0.720	0.760	0.800	0.840	0.880	0.920	0.960	1	1	1

TABLA 4. Coeficiente alfa (α).

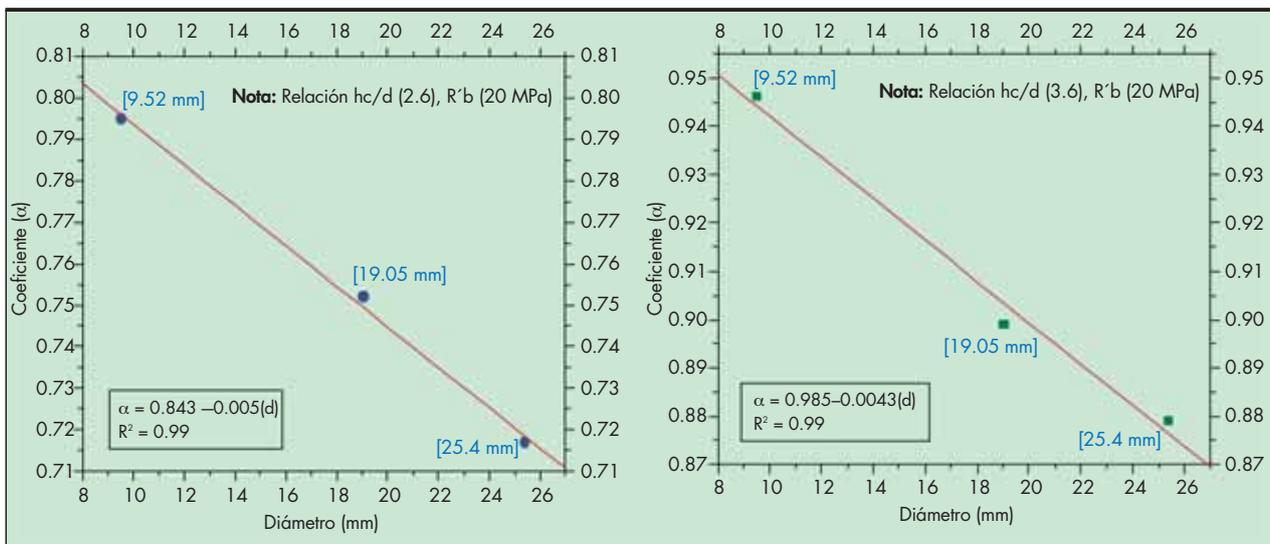


FIGURA 6. Modelos de regresión para los coeficientes de reducción al variar la relación h<sub>c</sub>/d.

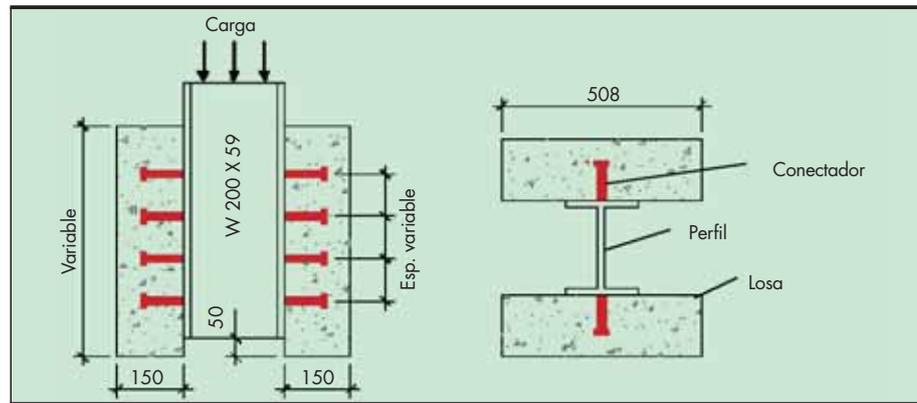


FIGURA 7. Configuración de la probeta para espaciamiento variable.

y posteriormente de 551.60 MPa (b). La diferencia fundamental, entre uno y otro caso, radica en el ligero incremento de la capacidad de carga cuando se usa 551.60 MPa y el incremento de la pendiente con tendencia lineal para valores de espaciamiento por encima de 5d. Al existir una mayor pendiente y por tanto un

mayor rango de variación de la capacidad de carga, entre un espaciamiento de 5d y el punto de inflexión (a partir del cual se alcanza un comportamiento asintótico), hace más desfavorable este caso a la hora de expresar cada punto como una fracción de la máxima capacidad de carga como se ha explicado.

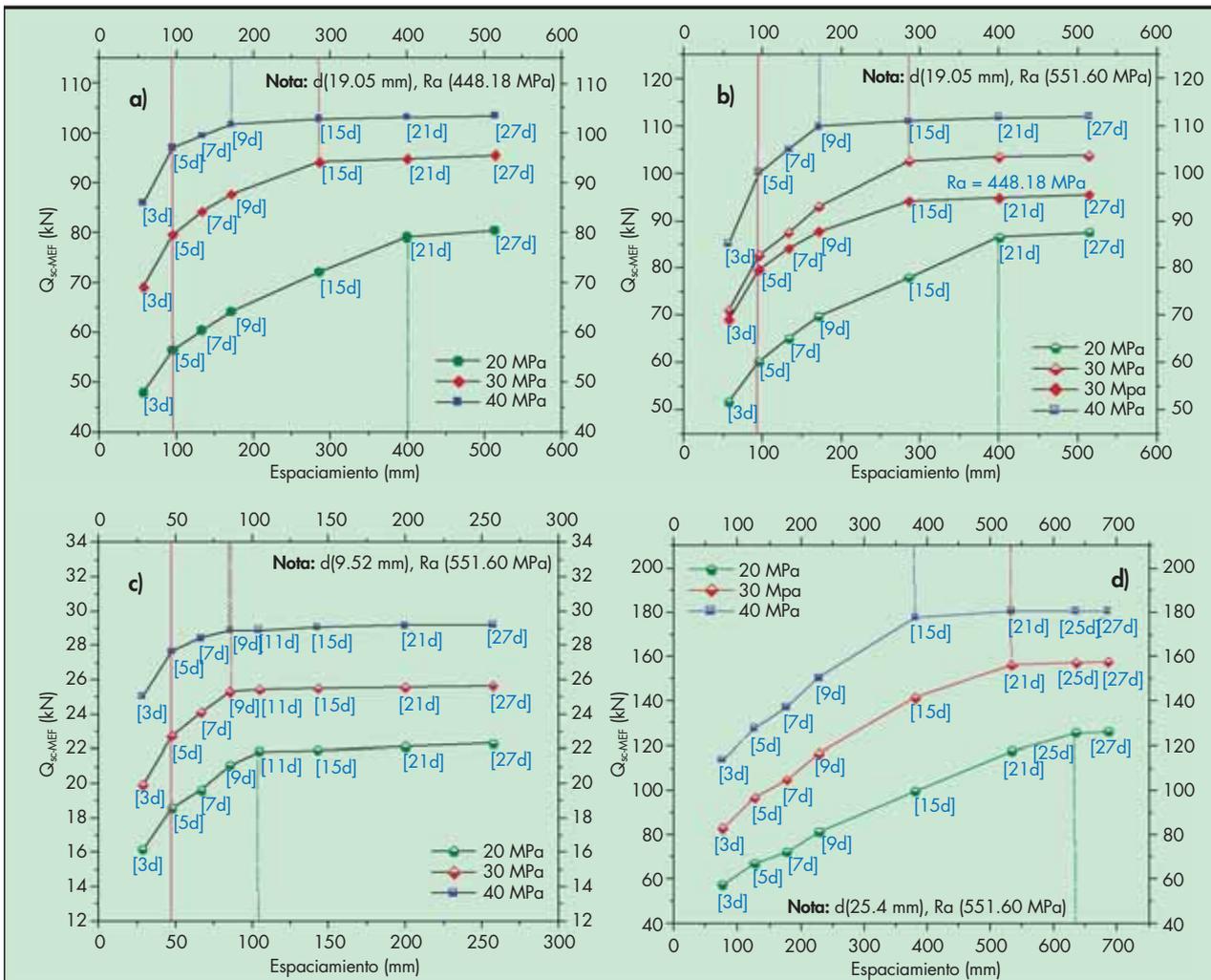


FIGURA 8. Comportamiento de la capacidad resistente para espaciamiento variable en conectores de: a) 19.05 mm y acero de 448.18 MPa, b) 19.05 mm y acero de 551.60 MPa, c) 9.52 mm y acero de 551.60 MPa, d) 25.40 mm y acero de 551.6 MPa.

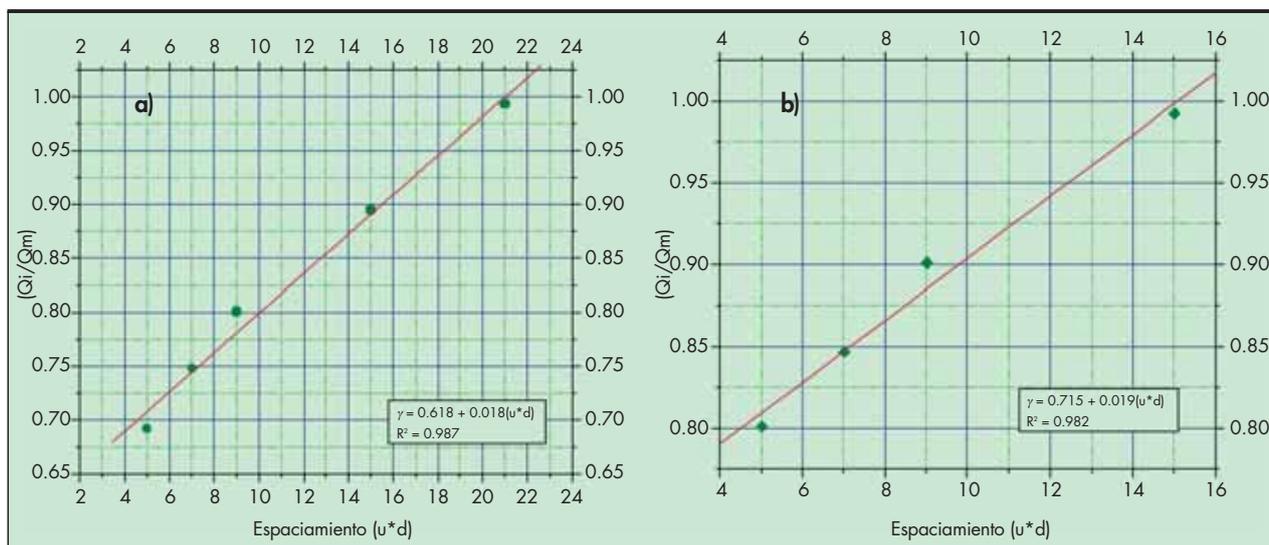


FIGURA 9. Modelos de regresión para conector de 19.05 mm: a)  $R'_b = 20$  MPa; b)  $R'_b = 30$  MPa.

A modo de ejemplo se han presentado en la figura 9 (a) y (b), dos modelos de regresión para conector de 19.05 mm y resistencias del hormigón de 20 y 30 MPa respectivamente. Se brindan igualmente las ecuaciones de regresión, además de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ).

En la tabla 5 aparecen los modelos de regresión obtenidos para cada diámetro y resistencia del hormigón estudiada, conjuntamente con el coeficiente  $R^2$  que demuestra la precisión del ajuste. Para obtener los coeficientes de reducción de los diámetros de 9.52, 19.05 y 25.40 mm, que aparecen en la tabla 6, se evalúa en las expresiones de los modelos, el espaciamento (valor numéricamente entero) como función de la cantidad de veces del diámetro a la que se encuentran espaciados los conectadores.

El la tabla 6 se puede observar como el coeficiente de reducción de los diámetros de 9.52, 19.05 y 25.40 mm disminuye para cada espaciamento, en la medida que se incrementa el diámetro, en cada una de las resistencias del hormigón. Esa variación tiene un comportamiento donde predomina la tendencia lineal, sobre todo para las resistencias del hormigón de 20 y 30 MPa. En cambio, para 40 MPa existe una tendencia a comportarse no linealmente. Con el objetivo de evitar el procesamiento de costosos modelos numéricos, los coeficientes de reducción gamma en los diámetros de 12.70, 15.88 y 22.22 mm se obtuvieron a partir de re-

gresión lineal de los ya calculados, donde en todos los casos se obtienen  $R^2$  superiores a 0.9, predominando los mayores a 0.95. Se realizaron varios ajustes no lineales, sobre todo para los valores de resistencia del hormigón de 40 MPa. Los mismos aparecen designados en la tabla 6 como (a). Como única alternativa posible se realizaron varios ajustes lineales para determinar algunos coeficientes para conectadores de 22.22 mm, apareciendo designados como (b).

En todos los casos el modelo de regresión pertenece a la familia de ecuaciones (6):

$$\gamma = a - b \cdot d^{(2c+1)} \tag{6}$$

Donde

d es el diámetro del conector.

(a) y (b) son coeficientes de la función que varían en dependencia del espaciamento longitudinal y la resistencia del hormigón.

(c) es un parámetro que varía en el intervalo [0-3].

Para 20 y 30 MPa, un modelo lineal donde (c) adopta el valor cero explica como ya se ha planteado adecuadamente, el comportamiento del coeficiente ( $\gamma$ ) al variar el diámetro. En cambio para resistencia de 40 MPa, el comportamiento de los coeficientes tiene una tendencia no lineal donde (c) adopta generalmente el valor de tres.

d (mm)	$R'_b$ (MPa)	Expresión del Ajuste	$R^2$	d (mm)	$R'_b$ (MPa)	Expresión del Ajuste	$R^2$
9.52	20	0.716+0.025(ud)	0.990	25.40	20	0.420+0.024(ud)	0.995
	30	0.769+0.025(ud)	0.999		30	0.508+0.024(ud)	0.981
	40	0.900+0.011(ud)	0.979		40	0.572+0.028(ud)	0.996
19.05	20	0.618+0.018(ud)	0.987				
	30	0.715+0.019(ud)	0.982				
	40	0.792+0.022(ud)	0.999				

TABLA 5. Modelos de regresión.

Gamma		Espaciamiento longitudinal									
d (mm)	R <sub>b</sub> (MPa)	5d	7d	9d	11d	13d	15d	17d	19d	21d	25d
9.52	20	0.841	0.891	0.941	0.991	1	1	1	1	1	1
	30	0.894	0.944	0.994	1	1	1	1	1	1	1
	40	0.955	0.977	1	1	1	1	1	1	1	1
12.70	20	0.789	0.838	0.887	0.936	0.947	0.958	0.973	0.998	1	1
	30	0.865	0.914	0.955	0.972	0.998 <sup>a</sup>	1	1	1	1	1
	40	0.950 <sup>a</sup>	0.970 <sup>a</sup>	0.999 <sup>a</sup>	1	1	1	1	1	1	1
15.88	20	0.728	0.777	0.826	0.875	0.893	0.914	0.939	0.984	1	1
	30	0.814	0.863	0.903	0.930	0.993 <sup>a</sup>	1	1	1	1	1
	40	0.936 <sup>a</sup>	0.957 <sup>a</sup>	0.993 <sup>a</sup>	1	1	1	1	1	1	1
19.05	20	0.708	0.744	0.780	0.816	0.852	0.888	0.924	0.960	0.996	1
	30	0.810	0.848	0.886	0.924	0.962	1	1	1	1	1
	40	0.902	0.946	0.990	1	1	1	1	1	1	1
22.22	20	0.608	0.657	0.706	0.755	0.785	0.825	0.872	0.923	0.971 <sup>a</sup>	1
	30	0.712	0.761	0.798	0.840	0.928 <sup>a</sup>	0.938 <sup>b</sup>	0.961 <sup>b</sup>	0.98 <sup>b</sup>	1	1
	40	0.827 <sup>a</sup>	0.872 <sup>a</sup>	0.932 <sup>a</sup>	0.940 <sup>b</sup>	0.969 <sup>b</sup>	0.996 <sup>b</sup>	1	1	1	1
25.40	20	0.540	0.588	0.636	0.684	0.732	0.780	0.828	0.876	0.924	1
	30	0.628	0.676	0.724	0.772	0.820	0.868	0.916	0.964	1	1
	40	0.712	0.768	0.824	0.880	0.936	0.992	1	1	1	1

TABLA 6. Coeficiente gamma ( $\gamma$ ).

## 8. CORRECCIÓN DE LA EXPRESIÓN DE CÁLCULO PARA CONECTADORES DE ELEVADO CALIBRE

La expresión para predecir la capacidad resistente última propuesta por Ollgaard et al. (1971) fue obtenida a partir de ensayos de conectadores en diámetros de 15.88 y 19.05 mm respectivamente. La misma fue adoptada por la AISC-LRFD y la NR 080-2004, manteniéndose vigente hasta la actualidad, siendo establecida con ciertas modificaciones en el Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004) (ver tabla 10).

Se ha realizado un estudio para evaluar la validez de estas expresiones, considerando una amplia gama de diámetros comerciales (12.7, 15.88, 19.05, 22.22 y 25.40 mm). En la figura 10 aparece una representación gráfica donde se establece una comparación con resultados obtenidos por la vía numérica con previa calibración experimental. Se observa como la expresión que establece el Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004) predice con buena aproximación, la capacidad resistente última de los conectadores, para los diámetros comprendidos entre 12.70 y 19.05 mm. Para los diámetros de 22.22 y 25.40 mm, que constituyen medidas comerciales, dicha normativa sobreestima en la mayor parte de los casos la capacidad resistente última de los conectadores y en ocasiones en valores superiores a un 15%. Por otra parte, la AISC-LRFD (2005) y NR 080-2004 sobreestiman para todos los diámetros analizados la capacidad resistente última de los conectadores. En algunos casos, para conectadores de 22.22 y 25.40 mm, estas diferencias se encuentran en el orden del 50%. (ver figura 10 d-e). Estas conclusiones a las que se ha arribado están en corres-

pondencia con los estudios de Lam y Ellobody (2005), quienes realizan un análisis muy similar en sus trabajos.

Finalmente, para el objetivo que persigue el presente epígrafe, se han considerado conectadores donde la relación ( $h/d$ ) es lo suficientemente elevada, de manera que este factor no afecte la capacidad resistente. Por otra parte, se evita la superposición de superficies de falla en el hormigón a consecuencia del reducido espaciado longitudinal de los conectadores, pues se ha tomado con fines de modelación y a la vez patrón de calibración la probeta de Lam y Ellobody (2005) que presenta un conectador a ambos lados del perfil I. Esto hace posible que se obtenga la plena capacidad del conectador. Por tanto, ( $\alpha$ ) y ( $\gamma$ ) son tomadas como la unidad.

Para realizar un estudio destinado a mejorar las expresiones de cálculo de conectadores se han utilizado recursos estadísticos. Los diseños de experimentos factoriales logran una gran eficiencia en el uso de los recursos experimentales disponibles y los resultados son aplicables en un rango de condiciones amplio debido a la combinación de los diversos factores del experimento, propiciando una ganancia debido a la reproducción latente que surge del arreglo factorial [Ostle (1974)].

Se realizó un diseño experimental  $3 \times 3 \times 3$  ( $3^3$ ), para así tener las diversas combinaciones de las variables que más influyen en la capacidad resistente de la conexión y por otro lado, evaluar como influyen dichas variables en la misma. Los factores considerados son: la resistencia del acero, el diámetro del conectador y la resistencia del hormigón a la compresión. En cada factor se consideran tres niveles, dos extremos y uno intermedio. En el caso del diámetro, se ubica

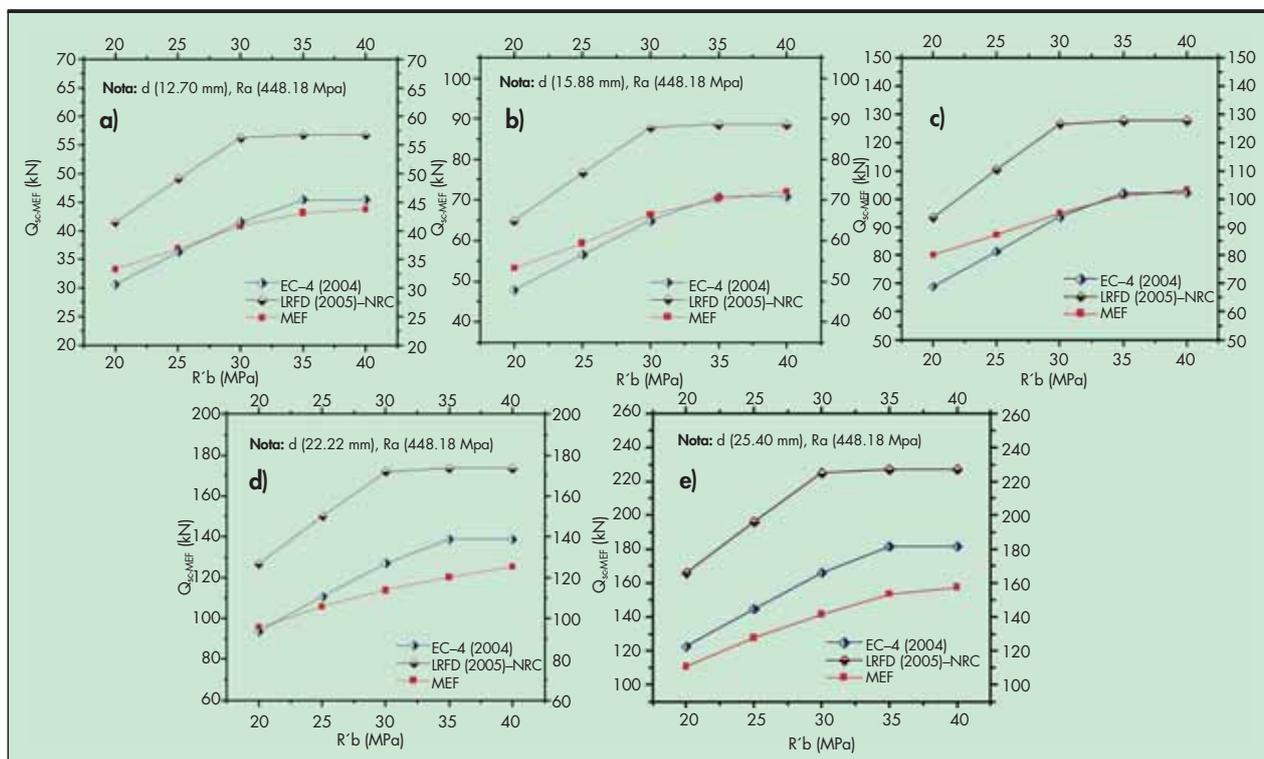


FIGURA 10. Estudio comparativo para diámetros de: a) 12.70 mm, b) 15.88 mm, c) 19.05 mm, d) 22.22 mm, e) 25.40 mm.

un nivel ficticio (nf) intermedio, pues este valor no existe en el surtido comercial. Lo anterior tiene una finalidad netamente investigativa y se hace aprovechando las bondades de la modelación, con el objetivo de evaluar el comportamiento de esta variable de una forma más continua. Para establecer el rango de variación de los niveles en la resistencia última del acero, han sido tomados como referencias los estudios experimentales de **Rambo-Roddenberry (2002)**, los cuales tienen en los conectadores una gama de resistencia entre 63.8 ksi (440 MPa) y 79.2 ksi (546 MPa) (ver tabla 7).

Se ha llevado a cabo un proceso de simulación con previa calibración a partir de los experimentos de **Lam y Ellobody (2005)**, para determinar la capacidad resistente última de los conectadores en cada una de las combinaciones del diseño propuesto. En la tabla 9 se resumen las diferentes combinaciones y los resultados de la modelación virtual, con los que se realizan diversos análisis de regresión empleando el paquete informático de estadística **SPSS v-11.5.1 (2002)**. Se estudian un total de 15 modelos estadísticos, siendo escogidos aquellos que mejor predicen la capacidad resistente de la conexión, a partir del análisis del coeficiente de determinación  $R^2$  y consideraciones ingenieriles de la interpretación de los resultados que se verán más adelante.

Para la concepción de cada modelo, se han tenido en cuenta aquellas variables que tienen una mayor influencia en la capacidad resistente de la conexión con el objetivo de minimizar la complejidad de las expresiones de cálculo propuestas. Para ello se ha realizado una correlación bivariada, cuyos resultados aparecen expresados en la tabla 8.

Al observar la tabla 8, es notable como las variables de mayor significación son la resistencia del hormigón, el módulo de deformación del hormigón y el área de la sección transversal del conectador, aun cuando en esta última es re-

lativamente bajo el rango de variación de los niveles del diámetro el cual se encuentran entre 22.22 y 25.40 mm. Por otra parte, la resistencia del acero tiene una influencia poco significativa en la capacidad resistente de la conexión, incluso con un rango de variación relativamente amplio. Estas conclusiones corroboran los resultados obtenidos en el estudio paramétrico antes realizado, donde se analiza la influencia en la capacidad resistente última de cada variable de manera individual y manteniendo constante el resto.

En la tabla 10 se brindan los modelos estadísticos propuestos. El primero de ellos está expresado en dos variantes preliminares muy similares al modelo original de **Oilgaard et al. (1971)**, quienes después proponen una segunda expresión simplificada a partir de la primera. En este sentido se ha realizado un procedimiento similar, transformando las expresiones para llegar a un modelo con mayor sentido práctico e ingenieril con formato funcional similar al de las principales normativas internacionales. El segundo modelo propuesto incluye la resistencia del acero, aunque se sabe, a partir de observaciones realizadas en epígrafes anteriores, que este parámetro en sus rangos de variación no tiene una significativa influencia en la capacidad resistente de la conexión. A pesar de ello el modelo brinda estadísticamente una adecuada precisión, respaldada por un coeficiente  $R^2$  relativamente elevado (0.901).

En la tabla 11, para diámetros de 22.22 y 25.40 mm, se resume de manera comparativa la predicción de capacidad resistente última de la conexión a partir de las expresiones vigentes en las normativas internacionales consultadas y los modelos propuestos. En las últimas cinco columnas se muestra el porcentaje en que difiere la capacidad resistente última, estimada por las expresiones de cálculo con relación a la obtenida por vía numérica ( $Q_{sc-MEF}$ ). Los valores negativos indican que se ha sobreestimado la capacidad resistente de la conexión.

Diseño factorial 3 <sup>3</sup>	
Factores	Niveles
Resistencia última del acero del conector a tracción ( $R_a$ )	448.18(65) , 499.80, 551.60(80) MPa (ksi)
Diámetro del conector (d)	22.22(7/8), 23.80(nf), 25.40(1) mm (in)
Resistencia del hormigón a la compresión ( $R'_b$ )	20(2900), 30, 40(5800) MPa (psi)

TABLA 7. Variables y niveles del diseño experimental.

$Q_{sc-MEF}$	Correlación de Pearson	$R'_b$	$E_b$	$R_a$	Área	$Q_{sc-MEF}$
		,827(**)	,830(**)	,241	,463(*)	1

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

TABLA 8. Correlaciones.

Al observar la figura 11 y la tabla 11, se puede concluir que el modelo **1-S** aunque presenta un  $R^2$  inferior a 0.9, en este caso 0.82, constituye una adecuada solución desde el punto de vista de la no sobreestimación de la capacidad resistente. Es válido aclarar que en los modelos **1-a** y **1-S**, no se descarta la posibilidad de los efectos de la multicolinealidad que pudiera existir entre las variables  $R'_b$  y  $E_b$ . No obstante, a partir de estudios reportados en la literatura, se ha podido concluir que la multicolinealidad no afecta el propósito del modelo cuando lo que se busca es pronosticar [Ostle (1974)]. Un indicador de la bondad del modelo es el  $R^2$ , que se puede sobreestimar cuando existe dicho efecto entre las variables, sin embargo se reitera su validez con fines de pronósticos. Si se compara con el modelo vigente en Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004), se aprecia que en la predicción hecha por dicha normativa existen 23 probetas con valores sobreestimados de un total de 27 para un 85%, mientras que por

la expresión **1-S** propuesta se observan siete para un 25%. De las siete probetas antes referidas, solo en tres se obtiene un resultado que difiere en más del 5% y menos del 13% del valor de capacidad resistente última teórica ( $Q_{sc-MEF}$ ).

La predicción hecha por el modelo 2 arroja en 10 casos resultados sobreestimados, representando un 37% y de ellos tres difieren en más de un 5%. Por tanto, se puede concluir teniendo en cuenta el coeficiente de determinación de 0.901, que esta constituye una solución adecuada y sin la presencia de efectos de multicolinealidad entre las variables.

El modelo **1-a**, que constituye el punto de partida y la base para expresar la variante simplificada **1-S**, brinda la solución más relevante, pues se conjugan dos factores en este caso: precisión y no sobreestimación en el cálculo, al predominar los valores en la zona conservadora. Se observa de un total de 27, solo dos puntos sobreestimados para un 7.4%, que a su vez difieren en menos del 2% (ver figura 11 y tabla 11).

Probeta	d (mm)	$R'_b$ MPa	$E_b$ MPa	$R_a$ MPa	$Q_{sc-MEF}$ (kN)	Probeta	d (mm)	$R'_b$ MPa	$E_b$ MPa	$R_a$ MPa	$Q_{sc-MEF}$ (kN)
P-1M-1	22,2	20	21466,25	448,18	95,69	P-1M-15	25,4	30	26290,68	551,60	151,12
P-1M-2	22,2	40	30357,87	448,18	125,19	P-1M-16	25,4	30	26290,68	448,18	141,37
P-1M-3	22,2	40	30357,87	551,60	145,36	P-1M-17	22,2	30	26290,68	448,18	113,86
P-1M-4	22,2	20	21466,25	551,60	101,77	P-1M-18	22,2	30	26290,68	551,60	131,28
P-1M-5	25,4	20	21466,25	448,18	110,55	P-1M-19	22,2	40	30357,87	499,80	135,39
P-1M-6	25,4	20	21466,25	551,60	120,26	P-1M-20	22,2	20	21466,25	499,80	99,14
P-1M-7	25,4	40	30357,87	551,60	180,50	P-1M-21	25,4	30	26290,68	499,80	147,14
P-1M-8	25,4	40	30357,87	448,18	162,83	P-1M-22	23,8	40	30357,87	499,80	152,02
P-1M-9	23,8	40	30357,87	551,60	161,49	P-1M-23	22,2	30	26290,68	499,80	119,24
P-1M-10	23,8	40	30357,87	448,18	139,94	P-1M-24	23,8	20	21466,25	499,80	105,30
P-1M-11	23,8	20	21466,25	448,18	102,44	P-1M-25	23,8	30	26290,68	551,60	142,08
P-1M-12	23,8	20	21466,25	551,60	107,57	P-1M-26	23,8	30	26290,68	448,18	127,10
P-1M-13	25,4	40	30357,87	499,80	174,48	P-1M-27	23,8	30	26290,68	499,80	132,24
P-1M-14	25,4	20	21466,25	499,80	115,50	Nota: $E_b$ es determinado como $4800(R'_b)^{0.5}$					

TABLA 9. Resultados de las diversas combinaciones del diseño de experimentos.

Modelos Existentes	Modelos Propuestos
<p><b>Ollgaard et al. (1971)-(AISC-LRFD 2005):</b></p> $Q_{sc} = 1.106 \cdot A_{sc} \cdot f_c^{0.30} \cdot E_c^{0.44}$ <p>se simplifica a la forma:</p> $Q_{sc} = 0.50 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{f_c \cdot E_c}$	<p><b>Modelo 1-a:</b></p> $Q_{sc} = 1.01 \cdot A_{sc} \cdot R'_b{}^{0.30} \cdot E_b{}^{0.45}; \quad R^2 = 0.901$ <p><b>Modelo 1-b:</b></p> $Q_{sc} = 0.92 \cdot A_{sc} \cdot R'_b{}^{0.30} \cdot E_b{}^{0.45}; \quad R^2 = 0.900$ <p><b>Simplificación derivada de 1-a ó 1-b. Modelo 1-S:</b></p> $Q_{sc} = 0.32 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{R'_b \cdot E_b}; \quad R^2 = 0.820$
<p><b>EUROCODE-4 (2003):</b></p> $Q_{sc} = 0.37 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}$ <p><b>Nota:</b> Considerando <math>\alpha = 1</math></p>	<p><b>Modelo 2:</b></p> $Q_{sc} = 0.11 \cdot A_{sc} \cdot R_a \cdot \sqrt{R'_b}; \quad R^2 = 0.901$

TABLA 10. Modelos estadísticos.

Después de analizados los diferentes modelos, así como los factores antes expresados y con el objetivo de mantener un formato similar a la clásica expresión vigente en las principales normativas internacionales, además siendo consecuente con la práctica ingenieril, se decide considerar para diámetros de 22.22 y 25.40 mm la expresión del modelo 1-S

( $Q_{sc} = 0.32 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{R'_b \cdot E_b}$ ), la cual es similar a la existente en las normativas, solo que el coeficiente constante en lugar de ser 0.5 como establece la **AISC-LRFD (2005)** y **NR 080-2004** ó 0.37 como plantea **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)**, se modifica en este caso, adoptando el valor de 0.32.

Se hace necesario comentar que en este trabajo se ha estimado el módulo de elasticidad del hormigón ( $E_b$ ) a partir de la expresión aproximada de  $4800(R'_b)^{0.5}$  ( $E_b, R'_b$  en MPa), siendo consecuente con las normativas cubanas, lo cual es aproximado a lo recomendado por el **ACI-318** para hormigones de densidad normal. Por su parte **Eurocode 2 (EN-1992-1:2001)** recomienda para la determinación del módulo de elasticidad ( $E_{cm}$ ) la expresión  $22[(f_{cm})/10]^{0.3}$  ( $E_{cm}$  en GPa y

$f_{cm}$  en MPa), la cual arroja valores superiores a lo estimado por el **ACI-318**. Ello hace que de haber utilizado el módulo estimado por **Eurocode 2 (EN-1992-1:2001)** en la expresión de **Eurocode 4** se obtuvieran en esta, valores de capacidad resistente última superiores a los obtenidos, sobreestimándose aun más dicho valor. En esencia, este trabajo evalúa la precisión de los modelos de pronóstico existentes en las normativas estudiadas, los cuales tienen base en el modelo de **Ollgaard et al. (1971)**, bajo las mismas condiciones.

## 9. EXPRESIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD RESISTENTE ÚLTIMA DE CONECTADORES

Teniendo en cuenta las limitaciones de las expresiones vigentes en la **NR 080-2004**, **AISC-LRFD (2005)** y **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)**, comprobadas a partir del estudio realizado previamente, que revela en muchos casos una sobreestimación de la capacidad resistente última, se llega al planteamiento de modificaciones a la expresión de cálculo

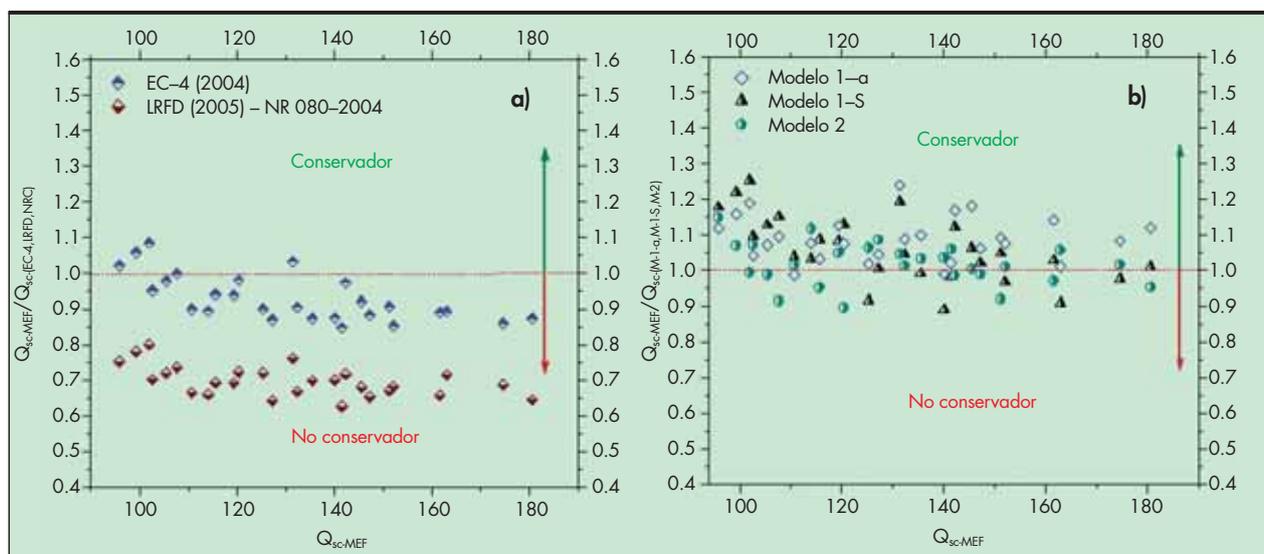


FIGURA 11. Predicción de la capacidad resistente a partir de: a) EC-4, NR 080-2004 y AISC-LRFD, b) Modelos propuestos.

Probeta	$Q_{sc-MEF}$ (kN)	$Q_{sc-LRFD}$ (kN)	$Q_{sc-EC-4}$ (kN)	$Q_{sc-Mod.1-a}$ (kN)	$Q_{sc-Mod.1-5}$ (kN)	$Q_{sc-Mod.2}$ (kN)	$Q_{sc-MEF} / Q_{sc-Mod.1-a}$	$Q_{sc-MEF} / Q_{sc-Mod.1-5}$	$Q_{sc-MEF} / Q_{sc-Mod.2}$	Difer. LRFD (%)	Difer. EC-4 (%)	Difer. Mod.1-a (%)	Difer. Mod.1-5 (%)	Difer. Mod.2 (%)
P-LM-1	95.69	126.81	93.65	85.45	81.16	83.01	1.120	1.179	1.153	-32.52	2.13	10.70	15.18	13.25
P-LM-2	125.19	173.47	138.78	122.96	136.49	117.40	1.018	0.917	1.066	-38.57	-10.86	1.78	-9.03	6.22
P-LM-3	145.36	213.26	157.50	122.96	136.49	144.49	1.182	1.065	1.006	-46.71	-8.35	15.41	6.10	0.60
P-LM-4	101.77	126.81	93.65	85.45	81.16	102.17	1.191	1.254	0.996	-24.60	7.98	16.04	20.26	-0.39
P-LM-5	110.55	166.00	122.59	111.86	106.24	108.67	0.988	1.041	1.017	-50.16	-10.89	-1.19	3.90	1.70
P-LM-6	120.26	166.00	122.59	111.86	106.24	133.75	1.075	1.132	0.899	-38.03	-1.94	6.99	11.66	-11.21
P-LM-7	180.50	279.18	206.17	160.96	178.68	189.15	1.121	1.010	0.954	-54.67	-14.22	10.83	1.01	-4.79
P-LM-8	162.83	227.09	181.68	160.96	178.68	153.68	1.012	0.911	1.060	-39.46	-11.57	1.15	-9.73	5.62
P-LM-9	161.49	245.11	181.02	141.32	156.88	166.07	1.143	1.029	0.972	-51.78	-12.09	12.49	2.86	-2.83
P-LM-10	139.94	199.38	159.51	141.32	156.88	134.93	0.990	0.892	1.037	-42.48	-13.99	-0.99	-12.11	3.58
P-LM-11	102.44	145.74	107.63	98.21	93.28	95.41	1.043	1.098	1.074	-42.27	-5.07	4.13	8.94	6.86
P-LM-12	107.57	145.74	107.63	98.21	93.28	117.43	1.095	1.153	0.916	-35.48	-0.06	8.70	13.29	-9.16
P-LM-13	174.48	253.24	202.60	160.96	178.68	171.38	1.084	0.977	1.018	-45.14	-16.12	7.75	-2.41	1.78
P-LM-14	115.50	166.00	122.59	111.86	106.24	121.19	1.033	1.087	0.953	-43.72	-6.14	3.15	8.01	-4.92
P-LM-15	151.12	225.00	166.16	138.40	144.00	163.80	1.092	1.049	0.923	-48.88	-9.95	8.42	4.71	-8.39
P-LM-16	141.37	225.00	166.16	138.40	144.00	133.09	1.021	0.982	1.062	-59.16	-17.54	2.10	-1.86	5.85
P-LM-17	113.86	171.87	126.93	105.72	110.00	101.67	1.077	1.035	1.120	-50.96	-11.48	7.14	3.38	10.70
P-LM-18	131.28	171.87	126.93	105.72	110.00	125.13	1.242	1.193	1.049	-30.92	3.32	19.47	16.21	4.69
P-LM-19	135.39	193.45	154.77	122.96	136.49	130.92	1.101	0.992	1.034	-42.88	-14.31	9.18	-0.81	3.30
P-LM-20	99.14	126.81	93.65	85.45	81.16	92.57	1.160	1.222	1.071	-27.91	5.54	13.81	18.13	6.62
P-LM-21	147.14	225.00	166.16	138.40	144.00	148.42	1.063	1.022	0.991	-52.92	-12.93	5.94	2.13	-0.87
P-LM-22	152.02	222.34	177.88	141.32	156.88	150.47	1.076	0.969	1.010	-46.26	-17.01	7.04	-3.20	1.02
P-LM-23	119.24	171.87	126.93	105.72	110.00	113.38	1.128	1.084	1.052	-44.14	-6.45	11.34	7.75	4.92
P-LM-24	105.30	145.74	107.63	98.21	93.28	106.40	1.072	1.129	0.990	-38.41	-2.22	6.73	11.41	-1.05
P-LM-25	142.08	197.54	145.89	121.51	126.43	143.82	1.169	1.124	0.988	-39.04	-2.68	14.48	11.01	-1.22
P-LM-26	127.10	197.54	145.89	121.51	126.43	116.85	1.046	1.005	1.088	-55.42	-14.78	4.40	0.53	8.06
P-LM-27	132.24	197.54	145.89	121.51	126.43	130.31	1.088	1.046	1.015	-49.38	-10.32	8.12	4.39	1.46

Nota: Las cinco últimas columnas expresan Difer. (Método que corresponde) (%), el cual se define como  $[(Q_{sc-MEF} - Q_{sc-METODO}) / Q_{sc-MEF}] * 100$

TABLA 11. Resumen comparativo de la capacidad resistente obtenida por las diferentes expresiones de cálculo.

de conectadores para sección mixtas de losa maciza de hormigón, quedando definida como:

$$Q_{sc} = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{R'_b \cdot E_b} \leq 0.8 \cdot A_{sc} \cdot R_a \quad (7)$$

Donde,

- $\alpha$ : Coeficiente que toma en cuenta la relación ( $h_c/d$ ). Consultar tabla 4.
- $\beta$ : Depende del diámetro del conectador y adopta los valores de 0.37 para  $d \leq 19.05 \text{ mm}$  y 0.32 para  $19.05 < d \leq 25.40 \text{ mm}$ .
- $\gamma$ : Coeficiente que toma en cuenta el espaciamiento longitudinal. Consultar tabla 6.

En la expresión (7),  $R'_b$  es la resistencia del hormigón en (MPa) y  $R_a$  es la resistencia última del acero del conectador a tracción en (MPa). Estas resistencias se refieren a valores prefijados en los modelos numéricos, no a valores característicos.  $A_{sc}$  es el área de la sección transversal del conectador en ( $\text{m}^2$ ) y  $E_b$  es el módulo de deformación del hormigón en (MPa).  $Q_{sc}$  es la capacidad resistente última en (MN).

Como se puede observar, la expresión (7) es función del espaciamiento longitudinal. Esta variable no es tenida en consideración directamente en las ecuaciones de cálculo de las normativas vigentes, pues solo se regula con cierto nivel de imprecisión, el espaciamiento mínimo como especificación.

## 10. CONCLUSIONES

Al finalizar este trabajo se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

- Quedó demostrado que existe necesidad y posibilidades del perfeccionamiento de las expresiones de cálculo de capacidad resistente última de conectadores tipo perno vigentes internacionalmente, en la tipología de viga y losa maciza de hormigón.
- A partir del estudio realizado se comprueba que la reducción de la capacidad resistente de la conexión al disminuir el valor de la relación ( $h_c/d$ ), no solo depende de dicha relación geométrica como establece **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)**, sino de otros factores como la resistencia del hormigón a la compresión y el diámetro del conectador propiamente. Esto permitió proponer un nuevo coeficiente de reducción para conectadores cortos considerando dichos parámetros.
- Se ha comprobado que **Eurocode 4 (EN-1994-1-1:2004)** predice adecuadamente la capacidad resistente de la conexión para diámetros inferiores o iguales a 19.05 mm, en casos donde no está presente el efecto de la proximidad (espaciamiento longitudinal) de los pernos y en conectadores con elevada relación ( $h_c/d$ ). Ello no se cumple bajo las mismas condiciones para diámetros de 22.22 y 25.4 mm, donde se obtienen resultados no conservadores.
- El espaciamiento longitudinal de los conectadores influye de manera directa en la capacidad resistente de la conexión, disminuyendo esta con la proximidad de los mismos. Aspecto que hizo necesario tomar en consideración este factor en la expresión de cálculo propuesta, a través de la introducción del coeficiente ( $\gamma$ ).

## 11. BIBLIOGRAFÍA

1. ACI-318-02: Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI. Detroit. 2002.
2. Bonilla, J. (2006): Estudio preliminar del comportamiento de conectores en estructuras compuestas mediante simulación numérica. Tesis de Maestría, Universidad Central de Las Villas, Sta Clara, Cuba, 96 p.
3. Bonilla, J. (2008): Estudio del comportamiento de conectores tipo perno de estructuras compuestas de hormigón y acero

mediante modelación numérica. Tesis de Doctorado. Universidad Central de Las Villas, Sta Clara, Cuba, 201 p.

4. Bonilla, J.; Larrúa, R.; Mirambell, E.; Recarey, C. (2007a): Estudio de la influencia de la resistencia del hormigón en el comportamiento de conectadores mediante simulación numérica y análisis experimental, Revista Ingeniería Civil, No 147, CEDEX, Madrid, España, p 57-64.
5. Bonilla, J.; Larrúa, R.; Mirambell, E.; Recarey, C. (2007b): Aplicación de la simulación numérica al estudio del comportamiento de conectadores tipo perno en estructuras mixtas de hormigón y acero, Revista Ingeniería Civil, No 148, CEDEX, Madrid, España, p 55-68.
6. Bonilla, J.; Larrúa, R.; Mirambell, E.; Recarey, C. (2007c): Simulación virtual del ensayo push out para conectadores tipo perno y con sección en U en estructuras mixtas hormigón-acero, Revista Ingeniería Civil, No 148, CEDEX, Madrid, España, p 83-93.
7. Davies, C. (1967): Small-Scale Push-Out Tests on Welded Stud Shear Connectors. Journal of Structural Engineer, Vol 40, No 2, p 311-316.
8. Easterling, W. S., Gibbings, D. R. y Murray, T. M. (1993): Strength of Shear Studs in Steel Deck on Composite Beams and Joist. Engineering Journal, AISC, Vol 30, No 2, p 44-55.
9. Eurocode 2 (EN 1992-1), Desing of concrete structures – Part 1 (2001): European Committee for Standardization, Brussels.
10. Eurocode 4 (EN 1994-1-1), Desing of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1.1(2004): European Committee for Standardization, Brussels.
11. Hawkins, N. M. y Mitchell, D. (1984): Seismic Response of Composite Shear Connections. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 110, No 9, p 2120-2136.
12. 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.
13. Lam, D. y Ellobody, E. (2005): Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam, Journal of Structural Engineering, Vol 131, No 1, p 96-106.
14. Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Building (2005): American Institute of Steel Construction (AISC), Inc., Chicago, IL.
15. Lubliner, J.; Oliver, J.; Oller, S. and Oñate, E. (1989): A Plastic-Damage Model for Concrete. International Journal of Solids and Structures, Vol 25, No 3, p 229-326.
16. NR 080-2004, Cálculo de entrepisos compuestos de hormigón y acero con vigas de alma llena sometidos a carga estática. Código de buenas prácticas (2004): Norma ramal del Ministerio de la Construcción de Cuba.
17. Oller, S. (2001): Fractura mecánica. Un enfoque global. CIMNE, Primera edición, Barcelona, España, 286 p.
18. 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.
19. Oñate, E. (1995): Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. CIMNE, Segunda edición, Barcelona, España, 830 p.
20. Ostle, B. (1974): Estadística aplicada, Editorial científico técnica, La Habana, Cuba, 629 p.
21. Rambo-Roddenberry, M. D. (2002): Behavior and Strength of Welded Stud Shear Connectors. PhD. Thesis University of Blacksburg, Virginia, EE.UU, 245 p.
22. Zienkiewicz, O. C. y Taylor, R. L. (2004): El Método de los Elementos Finitos, Quinta edición, Ed. CIMNE, Barcelona, España, Vol I, II, III.