

# ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO FRENTE A ESFUERZO CORTANTE EN FORJADOS UNIDIRECCIONALES DE VIGUETAS PRETENSADAS

AURELIO DOMÍNGUEZ ÁLVAREZ, LUIS VEGA CATALÁN, CECILIO LÓPEZ HOMBRADOS  
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. (CSIC)

DAVID IZQUIERDO LÓPEZ  
INTECSA

## RESUMEN:

Tradicionalmente, en la normativa española el comportamiento frente a esfuerzo cortante de los forjados de viguetas pretensadas y bovedillas ha recibido un tratamiento diferencial respecto de las formulaciones generales para elementos de hormigón. Dichos elementos no disponen, por lo general, de armadura transversal debido al proceso de fabricación.

En este trabajo se estudia el comportamiento de estos elementos a cortante. Se emplean distintas formulaciones, nacionales e internacionales, obteniendo los valores teóricos previstos mediante el cálculo y comparándolos con resultados experimentales. Para ello, se cuenta con más de 100 ensayos de resistencia a cortante de nervios de forjado. Estos datos corresponden a los ensayos que se realizan periódicamente en las instalaciones del IETcc, como parte del control de producción, en los productos en posesión del Sello CIETAN.

## ABSTRACT:

Particular theoretical expressions for shear resistance evaluation in beams and block floor systems have usually been different from general ones. These beams have no transversal reinforcement, because of the manner they are produced.

In this paper national and international formulas are used for the shear resistance evaluation. Values obtained are compared with experimental results. More than 100 experimental results of beams for floor system are used. The tests are made in the IETcc and correspond to periodical control during production in CIETAN Mark products.

## 1. Introducción

En la primera versión de la Normativa nacional para forjados, del año 1988 –Instrucción EF-88–, el valor de cortante de agotamiento por tracción en alma en el caso de viguetas estaba duplicado respecto al de la Instrucción de hormigón armado –EH-88–, permitiéndose aumentar dicho valor si además se refrendaba mediante ensayos sobre el producto acabado. Mientras tanto, la evolución de la Normativa Europea y Española ha estado marcada por un constante descenso, que será analizado más adelante, del valor del cortante admitido sin armadura de corte. Así, del valor tradicional de tensión rasante media obtenido en la ACI,

$$\tau_{rd} = 0,5 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{con } f_{cd} \text{ en kg/cm}^2) \quad \rightarrow \quad \tau_{rd} = 0,16 \sqrt{f_{cd}} \quad (\text{con } f_{cd} \text{ en N/mm}^2) \quad [E1]$$

se pasó a los valores claramente inferiores del ENV 1992 1-2 y los aún más bajos de la EHE, cuya fórmula sigue el Model Code '90 y fue incluida en los primeros borradores de la EN, en especial para cuantías bajas de armadura longitudinal.

$$V_{u2} = [0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,15 \cdot \sigma'_{cd}] \cdot b_0 \cdot d \quad [E2]$$

Esta diferencia se atenúa, aunque no desaparece, en la última versión de la EN (prEN 1992-1-1 Revised Final Draft - Abril 2003), donde se propone un tope inferior a la tensión tangencial admitida, aunque todavía bajo, de modo que no se llega a igualar, en especial para elementos armados, la situación anterior a la EHE, basada en la ACI.

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad \geq \quad (v_{min} - 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad [E3]$$

La normativa nacional de aplicación general, recogida en la Instrucción EHE, tiene idéntica expresión que la del EC-2, puesto que  $C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c = 0,18/1,5 = 0,12$  y el valor del coeficiente función del canto tiene la misma expresión  $k = \xi = 1 + (200/d)^{1/2}$

Sin embargo los resultados de la experimentación llevada a cabo en el seno del Sello de Conformidad CIETAN, tanto por los fabricantes mediante los procedimientos de control interno como por el IETcc en los ensayos de contraste, muestran claramente que los valores de agotamiento por cortante obtenidos superan ampliamente los valores determinados por cálculo de acuerdo con la Instrucción EF, que según se ha dicho eran superiores a los históricamente decrecientes de normativas generales.

Las características de los ensayos antes citados son sensiblemente similares a los definidos en la Instrucción EFHE, en la cual se ha optado por mantener como valor máximo para forjados el admitido por la EF-96, para canto total inferior a 350 mm y espesor mínimo de alma de la vigueta no mayor a 60 mm:

$$V_{u2} = 0,16 \sqrt{f_{cd}} \cdot b_w \cdot d \quad (\text{con } f_{cd} \text{ en N/mm}^2) \quad [E1]$$

$$V_{u2} = 0,32 \sqrt{f_{cd}} \cdot b_w \cdot d \quad (*) \quad (\text{con } f_{cd} \text{ en N/mm}^2) \quad [E4]$$

pero imponiendo que se verifique mediante ensayos en el control de producción del fabricante para poder aplicar la formulación (\*).

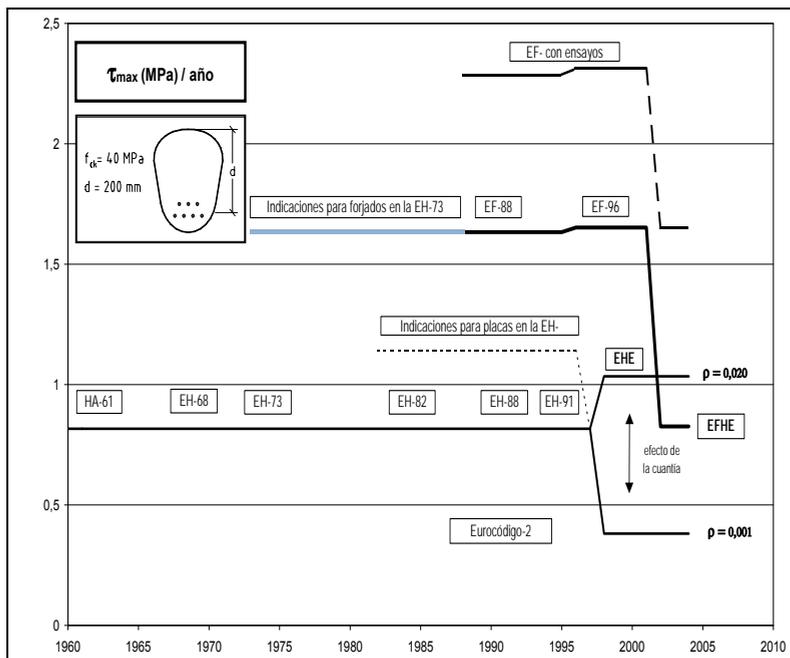


Figura 1. Evolución del valor máximo de la tensión tangencial admisible ( $\tau$ ) en la Normativa.

Los valores aquí representados se han obtenido para:

- hormigón tipo de resistencia característica  $f_{ck} = 40$  MPa (valor bastante frecuente en prefabricación de viguetas)
- sección general en la que  $d = 200$  mm (no son frecuentes cantos más reducidos y permite el valor más alto del coeficiente  $k$  según EC-2 -  $\xi$  según EHE)
- cuantía de armadura traccionada  $0,001 < \rho < 0,02$  (máxima admitida en la formulación).

## 2. Aspectos específicos de los forjados unidireccionales

En la actual Instrucción EFHE, el artículo 1º limita la tipología de forjados de viguetas a sistemas con canto total no superior a 50 cm, luz de cada tramo no mayor de 10 m y separación entre elementos resistentes que no exceda de 100 cm. Además, en el Anejo 5 para la realización de ensayos de resistencia a esfuerzo cortante en forjados de viguetas sin armadura transversal, limita los cantos a ensayar en el intervalo  $200 \text{ mm} \leq H \leq 350 \text{ mm}$

Las dimensiones de la viga suelen encontrarse entre 120 o 100 mm de altura, entre 40 y 55 mm de espesor mínimo de alma y base de la viga de 100 a 110 mm. Se emplea acero para pretensar de reducido diámetro, de 4 a 5 mm, con límites elásticos del orden de los 1600 – 1700 N/mm<sup>2</sup>, colocados en distintas capas y como mínimo 3 cordones. El hormigón de la viga es de 35-45 MPa, dependiendo normalmente de las necesidades de cada fábrica, la maquinaria empleada y la zona geográfica, la dosificación y con ello la calidad, del hormigón a colocar. El hormigón añadido en obra al forjado es normalmente de 25 MPa.

Las tensiones iniciales de tesado varían muy poco, entre 1300-1450 MPa, mientras que lo que sí presenta mayor variación es la evaluación de la pérdida de pretensado.

A modo de resumen, las características específicas de este tipo de sección mixta son:

- Luces de elementos estructurales entre 3,50 y 6,00 m
- Cantos totales reducidos, entre 200 y 350 mm
- Espesores de alma pequeños, entre 45 y 55 mm
- Bajas cuantías de armado (\*) y reducidos diámetros de acero  $\varnothing 4 - 5$  mm
- Hormigón de resistencia 35-45 MPa, con dosificaciones con baja relación a/c y tamaño máximo del árido entre 10-12 mm, debido sobre todo al proceso de fabricación.

### 3. Comparación entre los valores teóricos de cada normativa

Se indican aquí las distintas formulaciones “empleables” para evaluar la resistencia a cortante de nervios de forjados ejecutados con viguetas pretensadas, enumerando así mismo las particularidades o problemas de aplicación en cada uno de los casos:

- EFHE:  $V_{u2} = 0,16 \cdot (f_{ck})^{1/2} \cdot b \cdot d$  [E1]
- EFHE:  $V_{u2} = 0,32 \cdot (f_{ck})^{1/2} \cdot b \cdot d$  (con ensayos) [E4]
- EHE:  $V_{u2} = [0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,15 \cdot \sigma'_{cd}] \cdot b_0 \cdot d$  [E2]
- EC-2:  $V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \geq (v_{min} - 0,15 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d$  [E3]
- EC-2:  $V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} (2d/x) - 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \leq 0,5 \cdot b_w \cdot d \cdot v_{fd}$  [E3a]
- EC-2:  $V_{u2} = \frac{I_b}{S} \sqrt{f_{ct,d}^2 + \alpha \cdot \sigma_{cm} \cdot f_{ct,d}}$  [E3b]

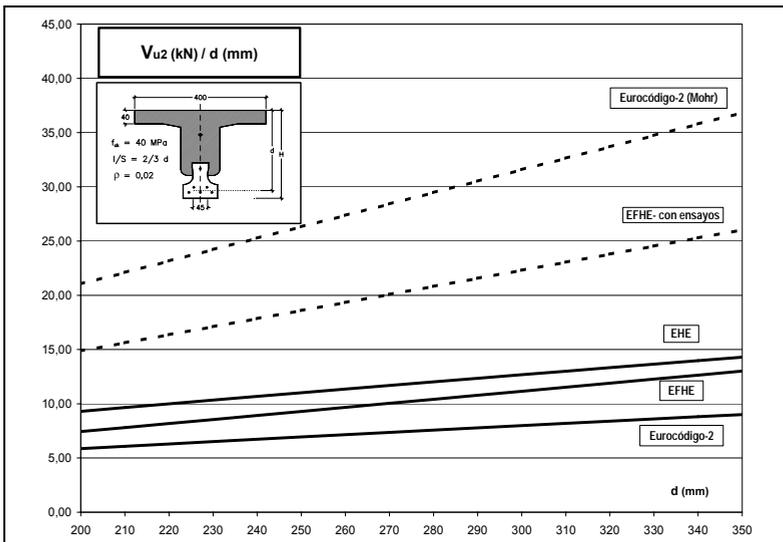


Figura 2. Valores de cortante resistido para una sección tipo.

En la gráfica, aparecen representados los valores teóricos para una sección genérica de canto variable, de hormigón en la vigueta  $f_{ck} = 40$  MPa, cuantía de armadura 0,02 (reducida un 25% en el caso de la formulación del EC-2 para tener en cuenta la no existencia del factor  $f_{yp}/f_{yk}$ ) y espesor del alma 45 mm. No se ha tenido en cuenta el efecto del pretensado.

Mediante la aplicación directa de la Instrucción específica para forjados unidireccionales, EFHE, para el cálculo de la resistencia a cortante habría que emplear [E1], con la que, al no depender de la cuantía de armadura traccionada ( $\rho$ ), se obtiene un mismo valor para una determinada geometría y hormigón, si importar el armado. Esto hace que para cuantías altas sea preferible emplear la formulación general de la EHE [E2]. Sin embargo, si se realizan ensayos de cortante como parte del control de producción, podría llegar a duplicarse el valor, empleando [E4].

La formulación que propone la Instrucción EFHE para fabricantes con control de producción que incluyan ensayos, esto es la [E4], determina valores siempre por encima de los que se obtienen con la [E2] de la EHE, si bien la formulación no tiene en cuenta efectos como el pretensado ( $\sigma'_{cd}$ ) o la cuantía de armado ( $\rho$ ).

También es posible aplicar la formulación de la Instrucción EHE [E2] teniendo en cuenta el efecto del pretensado. Esto es sencillo en los casos isostáticos de apoyo directo, aunque no sería correcto mantenerla dentro del mismo sumando  $V_{u2} = [f_{cv} - 0,15 \cdot \sigma'_{cd}] \cdot b_0 \cdot d$  ya que el pretensado no afecta a la sección completa, siendo preferible emplear:  $V_{u2} = [f_{cv} \cdot d - 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \cdot h_{vig}] \cdot b_0$ .

En los casos de apoyos indirectos, sería más complicado evaluar el efecto del pretensado, debiéndose incluir a efectos de cálculo la disposición constructiva del apoyo y asegurar su correcta ejecución. Por ello suele ser preferible obviar el pretensado, quedando del lado de la seguridad.

Aplicando la formulación general del Eurocódigo-2 [E3], que es la misma que la de la Instrucción EHE [E2], no se obtendrían exactamente los mismos valores, pues los factores de canto y cuantía son inferiores en la Normativa Europea respecto de los Nacionales:

— Aunque “k” y “ $\xi$ ” tienen idéntica expresión:

$$k = \xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$$

en el caso de la Normativa Europea se limita además el valor:  $k \leq 2$  con lo que en la Instrucción EHE, para cantos  $d \leq 200$  mm se obtienen valores  $\xi > k$

- En el caso de la cuantía, el factor ( $\rho$ ) incluye en la Instrucción EHE un cociente  $f_{yp}/f_{yk}$  que mayor el efecto del acero de pretensar en la formulación, obteniéndose valores mayores que alcanzan el 0,02 limitativo, cosa que no ocurre en la expresión del EC-2:

$$\rho_{EHE} = \frac{A_s + A_p \cdot \frac{f_{yp}}{f_{yd}}}{b d} \leq 0,02 \quad \rho_{EC2} = \frac{A_s}{b d} \leq 0,02$$

Al igual que en el caso de la [E2], puede aplicarse [E3] teniendo en cuenta el efecto del pretensado con las mismas limitaciones que se han indicado para el caso de la Instrucción EHE.

Además, el Eurocódigo-2 ofrece dos “ampliaciones” de la formulación general:

- En zonas próximas a los apoyos, a distancias  $0,5 \cdot d \leq x \leq 2 \cdot d$  la contribución del hormigón se mayor por el cociente  $2 \cdot d/x$  para tener en cuenta la ausencia de fisuras en el hormigón en zonas de flexión nula o de escaso valor [E3a]. El empleo de esta formulación en los casos de continuidad entre vanos, en las que el máximo cortante sollicitación aparece combinado con grandes momentos negativos, requeriría un estudio específico de la posible aplicación. No obstante, en el presenta trabajo sólo se analiza, como ya se indicó, el caso de elementos isostáticos biapoyados
- En elementos pretensados biapoyados en los que se garantice que  $M_d \leq M_o$  en las secciones donde se realice la comprobación, puede emplearse [E3b]. Que es la misma formulación que aparece en la Instrucción EFHE para losas alveolares pretensadas. Incluso el factor “ $\alpha$ ” que tiene en cuenta la transferencia del pretensado, tiene la misma expresión:

$$\alpha = \frac{x}{1,2 l_{bd}} \leq 1 \quad \text{con} \quad l_{bd} = \frac{\phi \sigma_p}{21}$$

$x$  es la distancia de la sección analizada al extremo del elemento

$l_{bd}$  es la longitud de transferencia de la armadura activa de pretensado (en mm), evaluada como:

$\sigma_p$  tensión de pretensado, después de las pérdidas, en MPa

$\phi$  diámetro de la armadura activa, en mm

#### 4. Procedimiento experimental

Los ensayos realizados por el Sello CIETAN se engloban dentro de la categoría de “inspección destructiva del producto acabado” que constituye uno de los compromisos del Sello para garantizar la calidad de la producción. Se realizan anualmente al menos dos ensayos de cortante sobre dos muestras, escogidas aleatoriamente de entre la producción, y de cada uno de los productos fabricados. Los valores obtenidos se contrastan con los resultados de los ensayos realizados por el fabricante en el control interno.

La muestra está constituida por viguetas de la misma clase, que son seleccionadas y marcadas durante la inspección a fábrica. Las clases así elegidas varían cada año, de manera que se cubra toda la gama dentro de la producción de la fábrica. El producto seleccionado está siempre completado con la información correspondiente a su número de autorización de uso, tipo de vigueta y forjado correspondiente, así como sus características físicas y mecánicas.

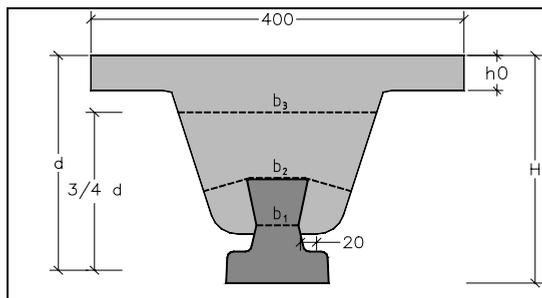


Figura 3. Sección general de las piezas ensayadas

Las piezas se colocan en el banco de ensayos, apoyadas en sus extremos por medio de rodillos metálicos y chapas de acero, disponiéndose el eje de dichos rodillos a una distancia de 10 cm del borde de la misma. Sobre las piezas se dispone un perfil metálico de reparto de carga, apoyado mediante rodillos metálicos y chapas metálicas tomadas con escayola, situados simétricamente respecto del eje de la pieza. En el centro del perfil actúa un gato AMSLER de 20 Mp de capacidad máxima. Los ejes de los rodillos de aplicación de la carga se sitúan a una distancia respecto a los ejes de los rodillos de apoyo de la pieza ensayada, igual a 3 veces el canto total de la ésta, como se indica en la figura 4.

Las cargas de rotura corresponden a aquellas bajo las cuales aumentan rápida o bruscamente las flechas de las piezas ensayadas al tiempo que disminuye la presión señalada en la máquina de carga, o bien cuando se produce la rotura del forjado. La carga se aplica gradualmente en forma lenta y continuada hasta alcanzar la rotura.

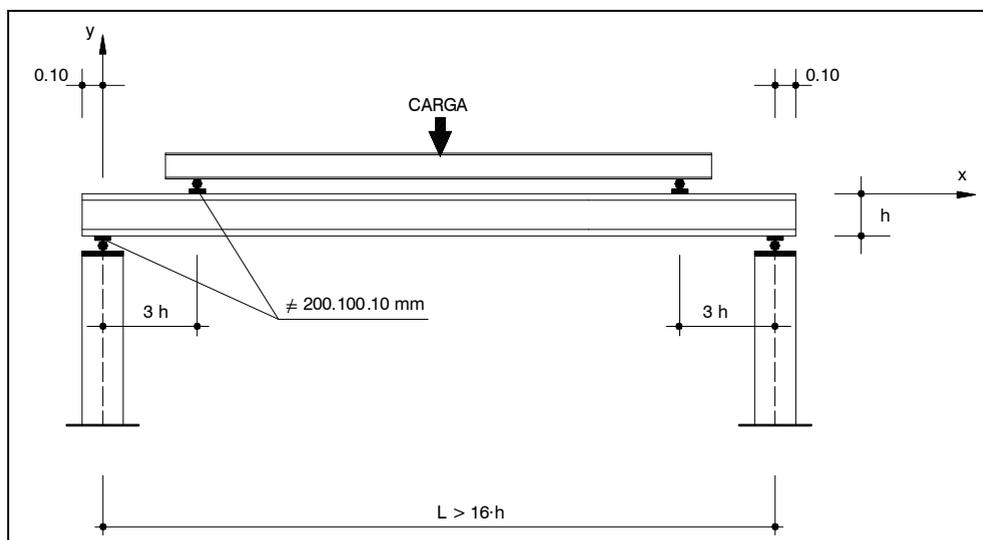


Figura 4. esquema de carga ensayo a cortante en piezas biapoyadas

## 5. Resultados obtenidos

Los datos de que se dispone corresponden a un total de 116 ensayos, realizados entre 1995 y 2002, englobando 16 tipos distintos de vigueta pretensada (Autorizaciones de Uso), aunque dentro de cada tipo se haya ido variando de canto o armado.

Los valores de canto total ensayados varían entre 200 y 290 mm. Las cuantías varían entre 0,01 y 0,04 calculadas según la Instrucción EHE [E2], si bien el máximo valor empleado ha sido 0,02.

El valor de  $f_{ck}$  empleado corresponde al que declara el fabricante en su Autorización de Uso como resistencia del hormigón de la vigueta. En los análisis se ha utilizado  $f_{cm}$ , obtenido a partir del valor de  $f_{ck}$  a partir de la relación:

$$f_{cm} = \frac{f_{ck}}{e^{-1,645v}} \quad \text{con} \quad v = 0,1 \quad (\text{coeficiente de variación de } 10\%)$$

Para cada una de las secciones y armados ensayados, conocidos los datos geométricos y mecánicos necesarios, se calcula el valor previsto de resistencia a cortante, según las distintas formulaciones comentadas. A continuación, se compara el valor obtenido en el ensayo, con el teórico, determinando el nivel de seguridad mediante el cociente:

$$\gamma = \frac{V_{ensayo}}{V_{calculo}} \geq 1$$

En la gráfica siguiente se muestra esta relación para todos los casos estudiados, ordenando en el eje X el número correspondiente de ensayo, y en eje Y, en orden decreciente, el nivel de seguridad para cada una de las fórmulas aplicadas.

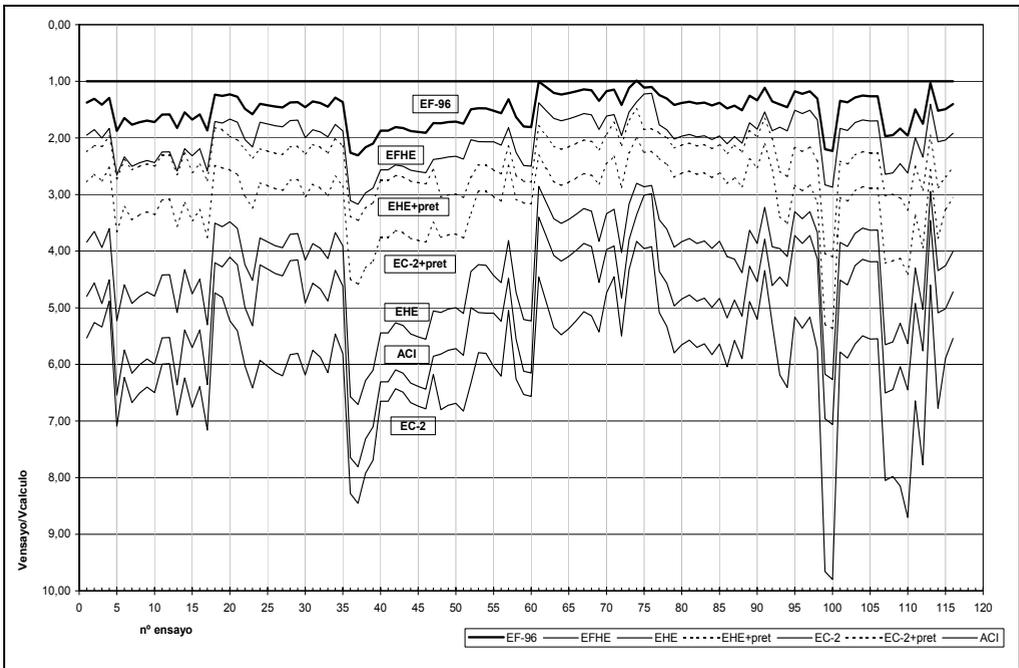


Figura 5. Relación  $V_{ensayo} / V_{teorica}$  para cada uno de los ensayos, ordenados por fabricante

La línea horizontal de valor  $\gamma = 1$  representa el requisito mínimo de seguridad, que debe cumplirse en todos los casos.

Como puede observarse, la resistencia prevista por las formulaciones generales de las Normativas de hormigón: Instrucción EHE, Eurocódigo-2 y ACI Americano, se alejan bastante del comportamiento real de los elementos ensayados.

### Conclusiones

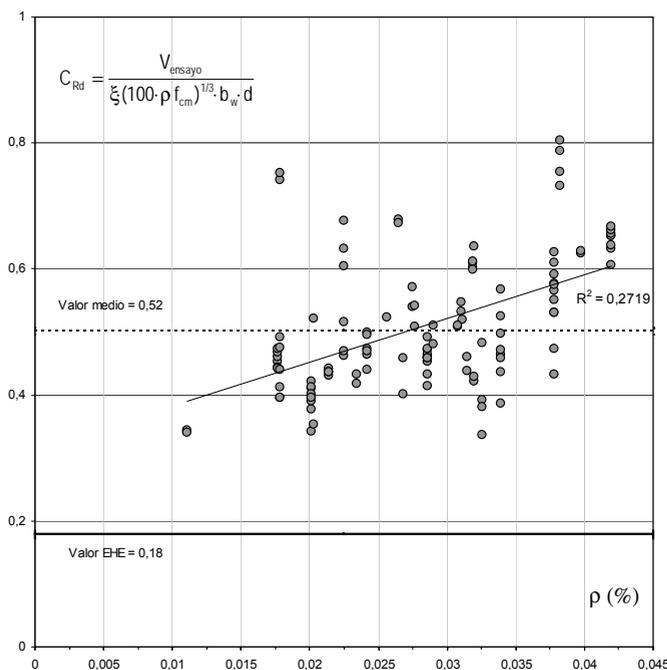
A partir de los datos obtenidos anteriormente, se ha realizado la siguiente gráfica, en la que se muestra el ajuste lineal para los resultados obtenidos con las fórmulas teóricas y el valor media aritmética de los cocientes  $V_{ensayo} / V_{teorico}$  para todos los ensayos:

- EC-2 / Mohr:	fórmula [E3b]	$\gamma_{med} = 0,99$
- EFHE:	fórmula [E4]	$\gamma_{med} = 2,00$
- EHE + pretensado:	fórmula [E2]	$\gamma_{med} = 2,36$
- EC-2 + pretensado:	fórmula [E3]	$\gamma_{med} = 3,04$
- EHE:	fórmula [E2]	$\gamma_{med} = 4,17$
- ACl:	fórmula [E1]	$\gamma_{med} = 4,92$
- EC-2:	fórmula [E3]	$\gamma_{med} = 5,93$

Como se observa, dentro del marco normativo nacional, la formulación general que se establece en la Instrucción EHE ofrecería un valor muy conservador ( $\gamma_{med} = 4,17$ ), lo que justifica el tratamiento diferencial de un elemento prefabricado tan concreto como es la vigueta pretensada para forjados unidireccionales.

En la gráfica siguiente se representa el valor de resistencia a cortante de los 116 ensayos. Se ha obtenido el coeficiente  $C_{Rd}$  que correspondería a cada ensayo, a partir de la resistencia media del hormigón ( $f_{cm}$ ) la cuantía ( $\rho$ ) y demás valores geométricos ( $d$  y  $b_w$ ).

La cuantía se ha evaluado a partir de la expresión de la EHE, donde se mayor el efecto del acero de pretensado por un factor de valor  $f_{yp} / f_{yd}$ .



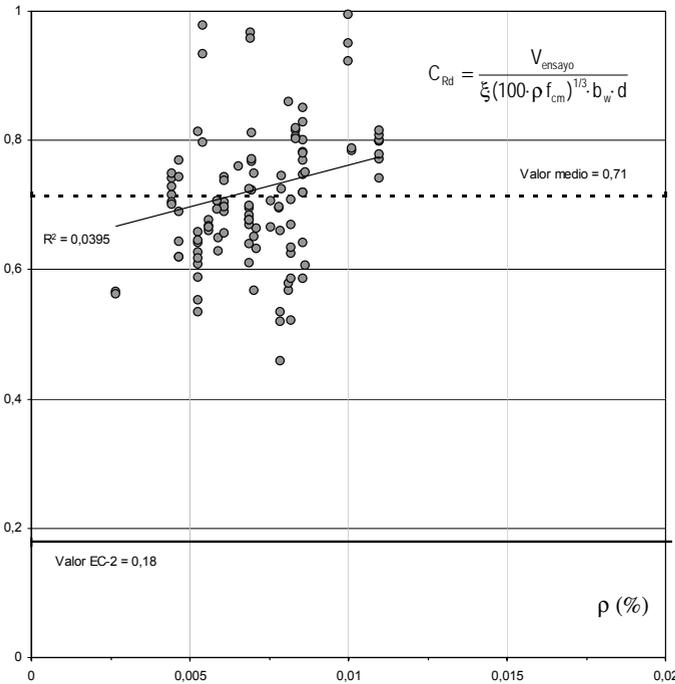
$$\rho_{EHE} = \frac{A_s + A_p \frac{f_{pd}}{f_{yd}}}{b \cdot d} \leq 0,02$$

Figura 6. Valores del coeficiente  $C_{Rd}$  aplicando la EHE (resultados de 116 ensayos).

Se puede representar el mismo gráfico para el caso de la formulación del Eurocódigo-2, que emplea la misma expresión que en el caso de Instrucción Española, con algunas salvedades.

Se aplican los mismos criterios comentados en el caso anterior, excepto en el valor de la cuantía de armadura traccionada, puesto que la formulación del EC-2 no tiene en cuenta la

relación entre los límites elásticos del acero pasivo y activo, reduciéndose drásticamente los valores del término  $\rho$  y por tanto también los de la resistencia a cortante.



$$\rho_{EC-2} = \frac{A_s + A_p}{b \cdot d} \leq 0,02$$

Figura 7. Valores del coeficiente  $C_{Rd}$  aplicando EC2 (resultados de 116 ensayos)

## Referencias

- D. José Calavera Ruiz “Proyecto y calculo de estructuras de hormigón” INTEMAC 2002. Ministerio de Fomento “Instrucción de hormigón estructural EHE”.
- Ministerio de Fomento. “Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados EFHE “
- Ministerio de Fomento. “Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados - EF-96”.
- Monografías ACHE – M6 – “Método de bielas y tirantes” Comisión 1 Grupo de Trabajo 1/3 (Enero 2003)
- David Fernández-Ordoñez Hernández, Dr. Ingeniero de Caminos “Mecanismos de respuesta frente al esfuerzo cortante en vigas prefabricadas” Tesis Doctoral (Dirigida por: Ángel Aparicio, José Calavera y Florencio del Pozo, Dres. Ingeniero de Caminos)
- CEN European Comitee for Standarization. EUROCODE-2: DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES (prEN 1992-1-1) Revised Final Draft
- ACI-318-95 American Concrete Institute. ACI manual of concrete practice part 3
- Comite Euro-International du Beton. CEB-FIP MODEL CODE 1990