

Evaluación del ajuste e introducción de la seguridad en el modelo experimental del EC-2 para estimar la capacidad a cortante en elementos lineales de hormigón armado sin armadura transversal

Evaluation of adjustment and introduction of safety in the EC-2 experimental model for the estimation of the shear strength of linear reinforced concrete specimens without transverse reinforcement

David Fernández Montes^{a,b,*}, Elena Díaz Heredia^{a,c} y Enrique González Valle^d

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, INTEMAC, Madrid, España

^bProfesor, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

^cProfesor, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

^dDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, ex profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

Recibido el 18 de julio de 2013; aceptado el 11 de diciembre de 2013

Resumen

El mecanismo de resistencia a esfuerzo cortante de las secciones de hormigón armado, es muy complejo, debido al gran número de factores influyentes que intervienen en la evaluación de esta resistencia. Dentro del marco de una investigación más extensa se realiza un análisis de las formulaciones que incorporan las normas ACI 318-11, CM 2010, EC-2 y EHE-08 a la luz de los resultados de ensayos existentes sobre rotura por cortante en elementos lineales sin armadura transversal. Aunque de los resultados del análisis se desprende la validez de los modelos simples de comprobación, se establecen conclusiones sobre la conveniencia de modificar las formulaciones actuales para mejorar su coherencia y su ajuste con los resultados experimentales.

© 2013, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Hormigón armado; Esfuerzo cortante; Hormigón de altas prestaciones; Relación de luz de cortante frente a canto efectivo

Abstract

It can be demonstrated that the mechanism of resistance regarding shear is very complex because of the great number of factors involved in the evaluation of this resistance. Within the framework of a more extensive investigation, an evaluation of the equations of the Spanish, European and American codes has been made in light of existing tests with reinforced concrete beams without transverse reinforcement on shear failure. Even though the validity of these simple verification models can be gathered from results of the analysis, conclusions about the convenience of modifying the current formulations to improve the coherence and the adjustments between theory and investigation have been established.

© 2013, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Keywords: Reinforced concrete; Shear strength; High strength concrete; Shear span

1. Introducción

Actualmente no existe un modelo sin lagunas con el que se pueda predecir el fallo por esfuerzo cortante en elementos de hormigón armado sin armadura transversal. Sin embargo, en

las últimas décadas, se han desarrollado modelos físicos o mecánicos basados en la mecánica de la fractura o de análisis no lineal con elementos finitos que permiten una buena aproximación del fenómeno, identificando parámetros y coeficientes a partir de una cierta experimentación [1-4].

No obstante lo anterior, debido al carácter prestacional de los marcos reglamentarios estructurales, la evaluación de la capacidad última a cortante de elementos de hormigón armado sin

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: dfernandez@intemac.es (D. Fernández Montes).

armadura transversal se simplifica en las normativas vigentes mediante la aplicación de una fórmula derivada de un ajuste experimental (en la que, en general, se identifican los parámetros más influyentes pero en la que no se cuantifica la interferencia de otros efectos relevantes), como alternativa a la aplicación de un modelo racional estructural de respuesta más complejo.

Las primeras investigaciones que se realizaron mediante modelos experimentales (Mörsch, E., 1909) se plantearon con el objetivo de determinar la relación entre la tensión media de cortante con la resistencia a tracción del hormigón. Actualmente, los modelos experimentales son la base de varios códigos vigentes para el cálculo del estado límite último a cortante, aunque existen notables diferencias entre las distintas fórmulas empíricas debido a varios factores:

- La falta de certeza en la influencia de los parámetros en la resistencia cortante, que se complementa con la complejidad de expresarlos en una fórmula del modo más simple posible.
- La representación de algunos parámetros influyentes es escasa en los ensayos considerados (sirva como ejemplo los pocos ensayos realizados de vigas con poca armadura longitudinal, de vigas realizadas con hormigones de alta resistencia o de vigas sometidas a solicitaciones de tracción).
- La resistencia a tracción del hormigón a menudo no es evaluada ni controlada.

Dentro del ámbito de una investigación más extensa, cuya parte experimental, realizada en el Laboratorio Central de INTEMAC, ha cubierto tanto el campo de los hormigones convencionales como de los hormigones de altas prestaciones, se realiza un análisis de las formulaciones que incorporan el Eurocódigo 2 [5] (EC-2), la Instrucción Española [6] (EHE-08), el Código Modelo 2010 [7] (CM 2010) y el Código ACI 318-11 [8]. El objetivo de este análisis es evaluar la coherencia y el ajuste de estas formulaciones con los resultados experimentales.

Para realizar dicho análisis, adicionalmente se consideran los datos de los ensayos incluidos en la base de datos recopilados en 2008 por Collins, Benz y Sherwood [9], correspondiente a 1848 ensayos que fueron publicados entre 1948 y 2006.

2. Objeto del análisis

Las formulaciones empleadas en la evaluación de la resistencia a cortante de los elementos lineales sin armadura transversal, que contemplan normas de aplicación común en diversos países, son muy diferentes.

Además, estas formulaciones presentan algunas faltas de coherencia tanto en sí mismas como con los resultados experimentales obtenidos en diferentes investigaciones realizadas al efecto. A modo de ejemplo, como se expone más adelante, la formulación general para estimar esta resistencia recogida en la EHE-08 y el EC-2 es coincidente, si bien el valor del cortante mínimo definido propuesto en la formulación de la Instrucción EHE-08 se incrementa de manera sustancial frente a los valores estimados de acuerdo a la formulación referente a dicho cortante mínimo del EC-2.

Por ello se realiza un análisis comparativo entre las formulaciones contempladas en las diferentes normas siendo el objeto de este artículo presentar sus resultados así como los del análisis de su contraste y coherencia con los resultados de ensayo que presentan determinadas bases de datos experimentales disponibles.

A partir de lo anterior, en este análisis se indican, en primer lugar, las formulaciones teóricas incorporadas en las normas EC-2, EHE-08, ACI 318-11 y el Código Modelo. Además, se expone la base de datos experimentales considerada para pasar a continuación a realizar el análisis de contraste de las formulaciones teóricas citadas.

En función de los resultados de este análisis se establecerán las conclusiones que se deriven y se formulará una propuesta de recomendaciones para mejorar en su caso tanto la metodología como el ajuste de la comprobación indicada.

3. Formulaciones teóricas sobre el comportamiento a esfuerzo cortante

Se consideran como significativas, para el presente estudio, las formulaciones incorporadas en la vigente EHE-08, en el EC-2, en el CM 2010 y en el Código ACI 318-11, tanto por su relevancia actual en el ámbito de la práctica como por su notoriedad en el ámbito de la investigación sobre esfuerzo cortante. A continuación se resumen los aspectos más importantes que incorporan los procesos de dimensionamiento y comprobación de la capacidad última a esfuerzo cortante por tracción excesiva de alma de acuerdo con los modelos y formulaciones citadas.

3.1. Formulación EC-2

La resistencia de cálculo a cortante de la pieza sin armadura de cortante ($V_{Rd,c}$) ha de ser superior al valor de cálculo del esfuerzo cortante (V_{Ed}):

$$V_{Rd,c} \geq V_{Ed} \quad (1)$$

donde:

$$\frac{V_{Rd,c}}{b_w \cdot d} = 0,12 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \quad (2)$$

con un valor mínimo de:

$$\frac{V_{Rd,c \min}}{b_w \cdot d} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} + 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \quad (3)$$

donde:

f_{ck} Resistencia característica a compresión (MPa)

k $k = 1 + \left(\frac{200}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \geq 2,0$

ρ_l $\frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \geq 0,02$

A_{sl} Área de armadura longitudinal (mm²)

σ'_{cd} Tensión axil media en el alma de la sección (tracción negativa)

$$\sigma'_{cd} = \frac{N_d}{A_c} < 0,2 \cdot f_{cd} \quad (4)$$

- N_d Fuerza axil en el alma de la sección (compresión positiva) (N)
 A_c Área bruta de la sección de hormigón (mm²)
 γ_c Coeficiente parcial de seguridad, igual a 1,5
 d Canto útil (mm)
 b_w Anchura mínima de la sección a lo largo del canto útil (mm)

En la versión definitiva del Eurocódigo, se pone el acento en el análisis seccional propuesto, y la contribución al esfuerzo de cálculo a cortante V_{ed} debe ser multiplicada por un término reductor $\beta = a_v/(2 \cdot d)$ si la carga se encuentra a una distancia de $0,5 \cdot d < a_v < 2,5 \cdot d$ del apoyo, aunque dicha reducción solo sea válida para cargas aplicadas en la parte superior del elemento y donde la armadura longitudinal esté completamente anclada al nudo. Para distancias de carga que cumplan $a_v < 0,5 \cdot d$, el valor de β será constante e igual a 0,25, donde cabe indicar que el término a_v se refiere a la distancia entre el borde de la placa de apoyo y el borde de la placa de aplicación de la carga [5].

3.2. Formulación EHE-08

Para estimar la capacidad resistente a cortante de elementos lineales de hormigón armado sin armadura transversal (V_u) se sigue la Ecuación (5) de origen experimental referente a piezas de hormigón armado en regiones fisuradas a flexión, la cual, del mismo modo que se indica en el apartado anterior referente al EC-2, debe ser superior al valor de cálculo del esfuerzo cortante en la sección considerada (V_d):

$$\frac{V_u}{b_0 \cdot d} = \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cv})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \quad (5)$$

con un valor mínimo $V_{u,min}$ que se obtiene de la Ecuación (6):

$$\frac{V_{u,min}}{b_0 \cdot d} = \frac{0,075}{\gamma_c} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot (f_{cv})^{\frac{1}{2}} + 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \quad (6)$$

donde:

- ρ_l Cuantía geométrica de la armadura longitudinal traccionada anclada a una distancia igual o mayor que d a partir de la sección de estudio.
 b_0 Anchura neta mínima menor del elemento (mm). En secciones rectangulares será el ancho y en secciones T o Π será el ancho mínimo del alma.
 f_{cv} Resistencia efectiva del hormigón a cortante en N/mm² de valor $f_{cv} = f_{ck}$ con f_{cv} no mayor que 15 N/mm² en el caso de control indirecto de la resistencia del hormigón, siendo f_{ck} la resistencia a compresión del hormigón. La EHE-08 solo permite su uso hasta $f_{ck} = 100$ MPa, adoptando para f_{cv} un límite superior de 60 MPa.
 σ'_{cd} Tensión axil media en el alma de la sección (tracción negativa) con un valor máximo indicado en Ecuación (7)

$$\sigma'_{cd} = \frac{N_d}{A_c} \leq 0,3 \cdot f_{cd} \leq 12 \text{ MPa} \quad (7)$$

- γ_c Coeficiente de seguridad parcial igual a 1,5 en situación persistente o transitoria. En la formulación de la EHE-98, ya derogada, el coeficiente $0,18/\gamma_c$ se expresaba como 0,12, el cual es igual al valor resultado de operar $0,18/1,5$.

Como puede observarse, la ecuación general adoptada en la EHE-08 es semejante a la recogida en el EC-2, salvo en la estimación del valor del cortante mínimo que resiste la sección de estudio, sin que se haya encontrado en la bibliografía consultada justificación de este aspecto, y en la consideración de la influencia del efecto de la relación a/d .

3.3. Formulación CM 2010

Para determinar la resistencia a cortante $V_{Rd,c}$, el Código Modelo [7] permite varios niveles de aproximación, los cuales difieren en la complejidad de los métodos aplicados y en la precisión de los resultados.

En general, el nivel de aproximación I (Ecuación (8)) puede ser usado para el dimensionamiento de una nueva estructura:

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w \quad (8)$$

donde:

- k_v Coeficiente cuya expresión es la siguiente:

$$k_v = \frac{200}{1000 + 1,3 \cdot z} \leq 0,15 \quad (9)$$

z $z \approx 0,9 \cdot d$

f_{ck} Resistencia característica a compresión del hormigón a cortante en N/mm² en el caso de que $\sqrt{f_{ck}} \leq 8$ MPa. En caso contrario, $\sqrt{f_{ck}} = 8$ MPa

El nivel de aproximación II es apropiado igualmente para el diseño de una nueva estructura así como para la valoración de una estructura existente pero no es aplicable a elementos sin armadura transversal.

En cuanto al nivel de aproximación III, es apropiado para el diseño de una estructura sometida a un estado de cargas complejo o para una valoración más elaborada de una estructura existente. Considera el diámetro máximo del árido y la deformación longitudinal en la fibra media de la sección.

La aplicación del nivel de aproximación IV requiere una cierta experiencia del proyectista para asegurar que los resultados obtenidos sean seguros y consistentes. La resistencia a esfuerzo cortante del elemento se determina mediante la comprobación de condiciones de equilibrio y compatibilidad de deformaciones usando diagramas de tensión-deformación apropiados para la armadura y el hormigón fisurado.

En todos los niveles de aproximación se considera el mismo término reductor β del esfuerzo de cálculo a cortante indicado en el EC-2.

3.4. Formulación ACI 318-11

La normativa americana [8] estima, de modo simplificado, la capacidad resistente a cortante de elementos lineales de hormigón armado sin armadura transversal no sometidos a solicitaciones axiales con la Ecuación (10):

$$\frac{V_c}{b_w \cdot d} = \phi \cdot 0,17 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (10)$$

donde:

- f'_c Resistencia específica del hormigón a compresión (N/mm²) menor que 70 MPa
- b_w Espesor mínimo del alma (mm)
- ϕ Coeficiente de comportamiento en cortante igual a 0,75

Cabe advertir que las formulaciones enunciadas no son directamente comparables, toda vez que la resistencia específica del hormigón (f'_c) representa un fractil del 9% mientras que la resistencia característica del hormigón (f_{ck}) representa un fractil del 5%.

4. Estudios previos y bases de datos experimentales disponibles

El primero de los términos de la ecuación para calcular la capacidad resistente a cortante de las secciones recogida en la EHE-08 (Ecuación (5)) y el EC-2 (Ecuación (2)) fue deducido a partir de un estudio preliminar y análisis de regresión de los resultados experimentales de 201 ensayos en los cuales el efecto arco tenía poca influencia.

En 2008, Collins, Benz y Sherwood [9] elaboraron una base de datos de ensayos de elementos cuya rotura se había producido por cortante (ESDB). Son 1.848 ensayos que fueron publicados por la ACI y en *Magazine of Concrete Research*, en *Engineering Structures*, en *Transactions of the Japan Concrete Institute* y en varias tesis doctorales e informes de campañas experimentales. Dicha base de datos se realizó de modo que ningún ensayo fue intencionadamente ignorado y, por supuesto, incluye ensayos de las anteriores bases de datos de ensayos publicadas en 1962, 2002, 2003 y 2006 por la ACI. Las reglas generales de selección de ensayos para la realización de la base citada son las siguientes:

- Hormigón armado.
- Secciones rectangulares y con forma de T.
- Sin solicitaciones axiales (tracción o compresión).
- Sin armadura transversal.
- Sin restricciones en el límite elástico de la armadura longitudinal.
- Cargas puntuales y cargas uniformes.
- Vigas simplemente apoyadas y continuas.
- No aparecen ensayos con fallos de anclaje.
- Sin límites geométricos.

En el presente estudio, intencionadamente se eliminan aquellos ensayos que pueden inducir resultados con mayores des-

Tabla 1

Intervalos de los valores de los parámetros influyentes de los ensayos considerado

Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo
f'_c	MPa	6,30	127,50
d	m	0,04	2,0
b	m	0,02	3,0
a/d	—	0,95	3,04
ρ	%	0,14	9,28

viaciones y, en consecuencia, menos precisos (tal es el caso de aquellos ensayos cuyo modo de fallo observado fue por flexión y ensayos realizados con cargas uniformes).

En la tabla 1 se muestran los intervalos de cada parámetro considerados en el análisis de regresión realizado que se expone en los siguientes apartados:

5. Ajuste de la formulación de los modelos de la EHE-08, EC-2, CM 2010 y ACI 318-11

Tal y como se indica anteriormente, el Estado Límite de Agotamiento por esfuerzo cortante en piezas sin armadura transversal se produce por tracción excesiva del alma. La expresión indicada por la EHE-08 y por el EC-2 es de origen experimental (Ecuación (2) y Ecuación (5)) y presenta dos términos sumatorios: el primer término depende tanto de la resistencia del hormigón f_{ck} como de la cuantía ρ_l de la armadura longitudinal de tracción existente y el segundo término refleja la influencia de las solicitaciones axiales, tanto de tracción como de compresión.

La estructura de la formulación del primer término fue obtenida por Zsutty a partir de un análisis de regresión [10]. Antes de realizar el análisis de regresión, Zsutty propuso un análisis dimensional para obtener el formato básico de la ecuación de predicción de capacidad cortante aplicando el teorema de Π de Buckingham con el que llegaba a cuatro términos adimensionales a partir de las variables V_{cr} (capacidad a esfuerzo cortante), b (ancho), d (canto efectivo), A_s (área de armadura longitudinal traccionada) y a (distancia del apoyo al punto de aplicación de la carga puntual en elementos biapoyados sometidos a cargas puntuales), los cuales son los siguientes:

$$Q_1 = \frac{V_{cr}}{b \cdot d \cdot k \cdot f'_c} \quad (11)$$

$$Q_2 = \rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (12)$$

$$Q_3 = \frac{d}{a} \quad (13)$$

$$Q_4 = \frac{b}{d} \quad (14)$$

Zsutty rechazó tener en consideración el término adimensional b/d porque los valores b/d de los ensayos pertenecientes a

la base de datos disponible eran semejantes y asumió que dicho cociente tenía muy poca influencia en la capacidad a cortante de elementos de proporciones normales. La ecuación adimensional para predecir la capacidad a cortante de un elemento estructural usada por Zsutty para el análisis de regresión fue:

$$\frac{V_{cr}}{b \cdot d \cdot k \cdot (f_c')^{b_1}} = (\rho)^{b_2} \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^{b_3} \quad (15)$$

En realidad, Zsutty decidió realizar dos análisis de regresión: uno para aquellos ensayos con relaciones a/d menores que 2,5, en los que se movilizaba el efecto arco, y otro para los ensayos con relaciones a/d mayores que 2,5.

El análisis de regresión realizado sobre los 151 elementos lineales con relaciones a/d mayores que 2,5, en los que actúan esfuerzos de flexión y cortante combinados, arrojaron los siguientes resultados, donde b_1 , b_2 y b_3 son las incógnitas a determinar de la Ecuación (15) mediante este procedimiento de análisis [11] (tabla 2).

El bajo coeficiente de variación del error indicó que la ecuación propuesta era consistente y que era posible una predicción satisfactoria para la capacidad a cortante de elementos lineales con relaciones a/d mayores que 2,5. Sin embargo, en el caso del análisis realizado en las 60 vigas sometidas al efecto arco, Zsutty consideró que los resultados no aportaban una ecuación satisfactoria y que era necesaria una investigación más profunda para predecir la capacidad a cortante en estos casos en los que la influencia del tamaño, la posición de las cargas y las condiciones de apoyo inducían una pobre correlación con un coeficiente de variación del error superior a un 25%.

En el caso de realizar el análisis con los datos cuya relación a/d fuera mayor que 2, el coeficiente de variación se incrementaba a un 15%. Esta es la razón por la que Zsutty estableció este valor para distinguir aquellos ensayos gobernados por el efecto viga y aquellos gobernados por el efecto arco.

Una vez obtenidos estos datos, Zsutty atendió al hecho de que los valores b_1 , b_2 y b_3 eran muy próximos entre sí y decidió racionalizar el resultado de su análisis aproximándolos a un valor igual a 1/3 para relaciones $a/d > 2,5$, sin afectar sensiblemente a las conclusiones ya expuestas.

El Código Modelo CEB-FIP, en 1990, sugiere [12] una fórmula empírica basada en la Ecuación (15), añadiendo un término adicional para tener en cuenta el efecto tamaño. König y Fischer [13] utilizaron esta fórmula experimental para realizar un análisis de regresión sobre 176 ensayos que avalaron una correcta deducción del término C de la estructura de esta formulación $(C \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_c')^{1/3})$. La Instrucción española, en 1998, y el Eurocódigo, en 2004, adoptaron esta formulación en valores de diseño.

Consecuentemente, dado que en la ESDB se incluye una relación de un número importante de ensayos cuya relación a/d es menor que 3, para realizar el análisis de los resultados obtenidos de la base de datos y de la campaña experimental realizada se considera necesario [14] que la influencia de la relación a/d se incluya tanto en la formulación expuesta en la EHE-08 como en la de la ACI 318-11, tal y como dedujo Zsutty para valores de relación a/d menores de 2,5 en la expresión que postuló de origen experimental y según recomendaron Hedman y Losberg [15] con relaciones a/d menores de 3.

En este sentido, las formulaciones del EC-2 y CM 2010 incluyen la influencia de la relación a/d , tal y como se indica en los apartados 3.1 y 3.3, por lo que no ha sido necesario deducir ningún modelo adicional.

La expresión deducida de la formulación para estimar la capacidad a cortante de los ensayos que no están sometidos a esfuerzos axiales según la EHE-08, es la Ecuación (16) expresada en valores medios:

$$\frac{V_{c,EHE-08}}{b_0 \cdot d} = C_{EHE}' \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c')^{1/3} \quad (16)$$

donde f_c' es la resistencia media a compresión del hormigón en la fecha del ensayo, y C_{EHE}' es el factor que representa la influencia adicional de la forma de la sección y de la relación a/d y que, por consiguiente, es necesario deducir a partir de un análisis de regresión.

La influencia de la forma de la sección sobre la capacidad a cortante fue originalmente intuita por los investigadores P.M. Ferguson y J.N. Thompson en 1953 [16]. Realizaron 24 ensayos en vigas biapoyadas de sección constante en T en varias series, en las cuales se variaba principalmente el ancho del alma, bien a lo largo de todo el canto de la sección o parcialmente a distintas alturas. Demostraron con esta campaña experimental que las ecuaciones usadas en la época podrían ser conservadoras cuando la dimensión del ancho del alma fuera mayor en la fibra neutra, a partir de lo cual convenía tener en cuenta una dimensión algo mayor del ancho mínimo del alma para el cálculo de la capacidad a cortante en vigas en T.

Por consiguiente, los modelos que predicen los valores de ensayo deberían incluir dicho efecto [17].

Se ha realizado un análisis de regresión simple mediante el método denominado «Stepwise» consistente en analizar únicamente la relación de la variable de respuesta $V_{c,EHE-08}$, la cual consta a su vez de varias variables cuya importancia en el modelo es significativa, con la variable predictora a/d . Dado que, a priori, no se puede deducir el tipo de modelo más razonable para explicar la relación de estos dos términos, se seleccionan varios subconjuntos de casos que tengan un valor particular para la variable predictora (0,50, 0,75, ..., 3,00) y, consecuentemente, sirvan para estimar el modelo de regresión.

En total se seleccionan 935 ensayos de ESDB (los intervalos de cada parámetro han sido indicados en la tabla 1), cuyo número de datos es incluso mayor que el utilizado por los ya citados por Zsutty y König y Fischer para deducir el coeficiente C_{EHE}' .

Tabla 2

Valores obtenidos por Zsutty mediante análisis de regresión de las incógnitas de la Ecuación (15) con 151 ensayos con relaciones $a/d > 2,5$

b_1	b_2	b_3	Coefficiente de variación del error
0,31	0,37	0,27	9,8 %

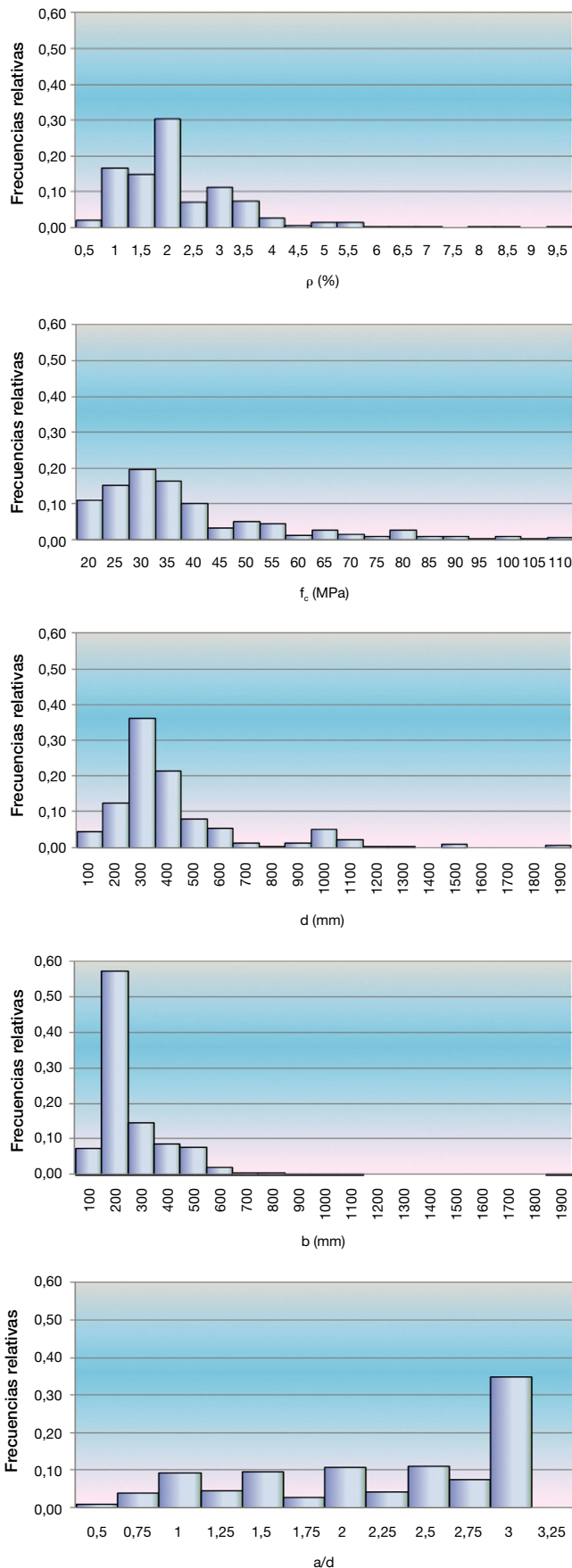


Figura 1. Frecuencias relativas de parámetros en los 935 ensayos extraídos de [9] para obtener el valor de cálculo del coeficiente C_{EHE}' en la Ecuación (16).

En la figura 1 se muestran las frecuencias relativas de cada uno de los parámetros considerados.

El siguiente paso es describir estadísticamente los datos observados para la variable de respuesta y la variable predictora mediante un tipo de tendencia potencial que, se considera, se ajusta con una mayor precisión a los valores discretos obtenidos por cada subconjunto seleccionado, con independencia de la forma de la sección transversal, tal y como se muestra en el gráfico de la figura 2.

Consecuentemente y como se indica anteriormente, se contemplan los ensayos con secciones transversales en forma de T en cada subconjunto de datos y se realizan nuevos análisis de regresión simple considerando únicamente los ensayos con forma de T en cada subconjunto de datos.

Los valores discretos de las variables predictoras en los modelos de regresión simple de la variable respuesta fueron menores para los subconjuntos de todos los ensayos considerados que para los subconjuntos de ensayos con secciones en T, siendo aproximadamente iguales con relaciones a/d superiores a 3,5. Por tanto, se deduce que la influencia de la forma de la sección considerada para predecir la capacidad a cortante debe ser tenida en cuenta, en especial con relaciones a/d bajas.

En este sentido, varios investigadores han considerado la influencia de este parámetro en sus fórmulas predictoras. Por ejemplo, Bairán, Marí, Romía y Ametller [18] presentaron un estudio paramétrico sobre el comportamiento resistente de secciones de hormigón armado sometidas a esfuerzo cortante y a sollicitaciones axiales en el que incluían dicha influencia para relaciones a/d iguales a 1,5, 2 y 3. Del mismo modo, Haddadin, Hong y Mattock [19] incluyeron la influencia de la geometría de secciones en T junto con la influencia de la relación a/d al estimar la eficacia de la disposición de cercos en un elemento lineal sobre la capacidad a cortante.

Por tanto, adicionalmente se introduce la influencia de la forma de la sección del elemento lineal en el caso de que la relación a/d sea menor que 3 mediante la relación b_f/b_w , donde b_f es el ancho del ala sometida a tensiones de compresión por el momento aplicado y b_w es el ancho mínimo del alma de la sección (equivalente a la variable b_0 indicada en la EHE-08 para

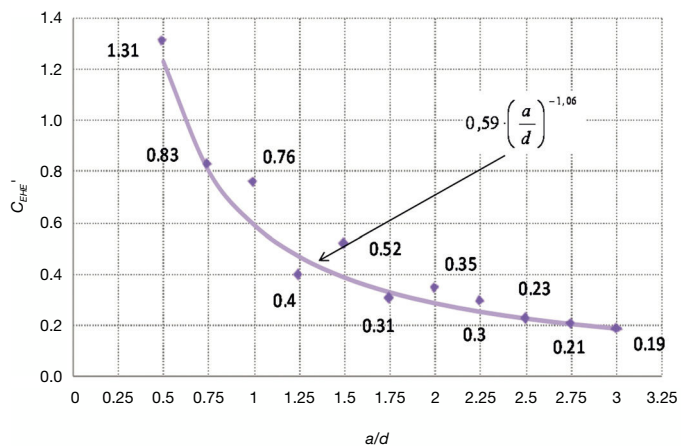


Figura 2. Relación entre las variables a/d y C_{EHE}' a partir de los 935 ensayos seleccionados sin considerar la influencia de la forma de la sección transversal.

secciones en T con ancho de alma constante). Para ello se realizó un nuevo análisis de regresión múltiple considerando todos los ensayos con secciones en forma de T de la base de datos de Collins, Benz y Sherwood cuya relación a/d fuera menor que 3 para realizar el ajuste del término que incluyera la variable predictora b_f/b_w .

En total se han considerado 65 ensayos para realizar el análisis de regresión múltiple que implemente la influencia de la forma de la sección. Sin embargo, dado el bajo número de ensayos que presentan valores de la variable b_f/b_w superiores a 3 (7 ensayos), no se implementa un valor superior a 3.

Por consiguiente, la variable C_{EHE}' incluye la influencia de la forma de la sección transversal y de la relación a/d y responde a la tendencia potencial siguiente:

$$C_{EHE}' = \left[0,59 \cdot \left(\frac{a}{d} \right)^{-1,06} \right] \cdot \left[\left(\frac{b_f}{b_w} \right)^{0,30 \cdot (3 - \frac{a}{d})} \right] \quad (17)$$

Con la formulación del código ACI 318-11 se sigue el mismo procedimiento, obteniendo la variable C_{ACI}' , que se desprende de la Ecuación (19), de tendencia potencial, y que multiplica la expresión simplificada para la estimación de la capacidad a cortante de la normativa americana en valores medios, del siguiente modo:

$$\frac{V_{c,ACI318-11}}{b_w \cdot d} = C_{ACI}' \cdot \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6} \right) \quad (18)$$

$$C_{ACI}' = \left[4,52 \cdot \left(\frac{a}{d} \right)^{-1,37} \right] \cdot \left[\left(\frac{b_f}{b_w} \right)^{0,25 \cdot (3 - \frac{a}{d})} \right] \quad (19)$$

6. Análisis cualitativo de los modelos de cálculo

En este apartado se ponen de relieve varios aspectos que deben ser observados en el modelo de cálculo deducido de la EHE-08 para elementos de hormigón armado sin armadura transversal no solicitados a esfuerzos axiales, objeto del presente análisis:

- El modelo de la EHE-08 y el EC-2 establece recomendaciones de valores límite en las variables predictoras por escasez de evidencias experimentales. Sirva como ejemplo la limitación establecida para el valor de la variable ξ con la que se incluye la influencia del efecto tamaño (no mayor que 2,0), la limitación de la cuantía geométrica longitudinal (no mayor que 0,02) o la limitación de la resistencia efectiva del hormigón a cortante (no mayor que 60 MPa). Dicho aspecto debería ser revisado con bases de datos experimentales actualizadas.
- Los modelos citados establecen un valor de cortante mínimo, si bien este límite inferior no es el mismo (ver Ecuación (3) y Ecuación (6)). Dicho límite fue establecido para evitar que la estimación de la capacidad a cortante fuera nula en

elementos estructurales con una cuantía de armadura longitudinal nula [20]. Cabe indicar que en ambos casos, en la bibliografía consultada, no se incluye ninguna justificación o evidencia experimental sobre su aplicación. En concreto, debería ser analizada la investigación experimental realizada con elementos de hormigón armado con bajas cuantías ($\rho < 0,6 \%$) y grandes cantos ($d > 1000$ mm), tanto en hormigones convencionales como de altas prestaciones. Además, la necesidad del establecimiento de un valor mínimo a cortante debería ser objeto de estudio, toda vez que ambas normas contemplan la influencia de las solicitaciones axiales de compresión y el uso de hormigón en masa y definen una cuantía mecánica mínima para la comprobación y dimensionamiento de elementos de hormigón armado.

- La influencia de parámetros tales como la relación a/d o la forma de la sección [21] puede llegar a ser relevante en la evaluación de la capacidad resistente del elemento por lo que dicho aspecto debería, al menos, ser investigado y, en su caso, ser implementado en las expresiones de los modelos considerados en este estudio.

7. Ajuste de la formulación del modelo propuesto

Se contempla la posibilidad de un nuevo ajuste de la expresión indicada por el EC-2 y la EHE-08 para calcular el esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma en elementos lineales sin armadura transversal que no están sometidos a solicitaciones axiales, extraída previamente la seguridad mediante análisis de regresión semejantes a los indicados anteriormente considerando los datos de la ESDB, ya citada.

Se reconsidera el procedimiento de análisis de regresión múltiple realizado por Zsutty sobre una expresión semejante a la Ecuación (15) para predecir la capacidad a cortante de un elemento estructural lineal sin armadura transversal y sin considerar la aplicación de solicitaciones axiales:

$$\frac{V_{EST}}{b_w \cdot d \cdot k \cdot (f'_c)^{b_1}} = (\rho)^{b_2} \cdot \left(\frac{d}{a} \right)^{b_3} \quad (20)$$

donde:

V_{EST} Esfuerzo cortante de agotamiento en valores de ensayo sin considerar la influencia de las solicitaciones axiales de tracción (N)

b_w Anchura neta mínima menor del elemento (mm). Es equivalente a la variable b_o considerada en la formulación de la EHE-08

Adicionalmente, se considera que la variable k responde a la Ecuación (21):

$$k = K \cdot \frac{1}{\xi} = K \cdot k(\xi) \quad (21)$$

donde K es una constante por determinar en el análisis de regresión.

En este sentido, es de destacar que no se incluye el término ξ , dependiente del canto efectivo, como variable predictora del análisis múltiple de regresión, dado que se conserva el factor de corrección por efecto tamaño incluido en la Instrucción EHE-08 en la expresión del ajuste. El hecho de considerar esta variable como predictora en el análisis supondría la modificación de la expresión del factor ξ .

Asimismo, la fórmula de ajuste no considera los límites superiores de las variables correspondientes a la cuantía geométrica de armadura longitudinal y a la resistencia a compresión del hormigón que se incluyen en la EHE-08 o el EC-2 así como las expresiones que establecen un valor mínimo de cortante (cuya justificación experimental no se ha encontrado en la bibliografía consultada), para no condicionar a priori los resultados estadísticos del modelo de regresión.

Al igual que antes, para realizar los análisis de regresión múltiple se consideran los subconjuntos de datos de la ESDB con relaciones a/d constantes e iguales a 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 y 3,5. Hay que recordar que por cada subconjunto considerado de datos que presenta relaciones a/d semejantes se realiza un análisis de regresión y, por consiguiente, no se puede evaluar su influencia como variable predictora en un análisis múltiple de regresión que incluya únicamente los datos del subconjunto establecido. Por consiguiente, en el análisis de regresión múltiple realizado en cada subconjunto de datos se han eliminado los términos referentes a a/d y b_3 dado que se ha considerado insignificante su influencia en cada subconjunto.

Específicamente, las constantes K , b_1 y b_2 de la Ecuación (20) se obtienen finalmente del análisis múltiple de regresión de cada subconjunto de datos en la forma logarítmica de la Ecuación (22):

$$\ln\left[\frac{V_{EST}}{b \cdot d \cdot k(\xi)}\right] = \ln(K) + b_1 \cdot \ln(f_c) + b_2 \cdot \ln(\rho) \quad (22)$$

Los valores de las constantes resultantes del análisis de regresión realizado para cada subconjunto de datos se muestran en la tabla 3.

Al igual que Zsutty decidió aproximar los valores de las variables b_1 y b_2 a un valor igual a 1/3 para relaciones $a/d > 2,5$, se decide racionalizar la expresión del ajuste con un valor de b_1 igual a 0,3 y un valor de b_2 igual a 0,5, los cuales representan el valor medio de los valores obtenidos de cada coeficiente por subconjunto de datos considerado.

En este sentido, se propone una expresión en la que la influencia de la cuantía geométrica de armadura longitudinal es

mayor que en la Ecuación (16), la cual, expresada en valores medios, es la siguiente:

$$\frac{V_{EST}}{b_w \cdot d} = C_{EST}' \cdot \xi \cdot [(100 \cdot \rho)^{0,5} \cdot f_c^{0,3}] \quad (23)$$

donde C_{EST}' es el factor que representa la influencia adicional de la forma de la sección y de la relación a/d y que es necesario deducir a partir de análisis simples adicionales de regresión mediante el método «Stepwise» indicados en el apartado anterior. Responde a la Ecuación (24) para relaciones $a/d < 3$ [21]:

$$C_{EST}' = \left[0,76 \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{-1,23} \right] \cdot \left[\left(\frac{b_f}{b_w}\right)^{0,14 \cdot (3 - \frac{a}{d})} \right] \quad (24)$$

Cabe indicar que las predicciones expuestas para la propuesta preliminar de la capacidad a cortante en elementos de hormigón armado sin armadura transversal realizada por Cladera y Marí [22] concluyen en una influencia proporcional a $\rho^{0,5}$ tanto para hormigones de altas prestaciones como para hormigones normales mediante la aplicación del desarrollo de Redes Neuronales Artificiales (ANN), del mismo modo que recogemos en la Ecuación (23).

8. Análisis y comparación de las diferentes propuestas de evaluación de la capacidad a cortante de elementos de hormigón armado sin armadura transversal sin considerar la influencia de solicitaciones axiales

En la tabla 3 se muestran los resultados estadísticos obtenidos al comparar los valores de esfuerzo cortante de agotamiento de los ensayos seleccionados (V_{exp}) con las estimaciones obtenidas (V_{calc}) con la Ecuación (23), la Ecuación (16) del modelo deducido de la EHE-08, la Ecuación (2) del deducido del EC-2, la Ecuación (8) dada por el nivel de aproximación I del CM 2010 y la Ecuación (18) del modelo deducido de

Tabla 3

Valores de las constantes resultantes de los análisis de regresión múltiple realizados por cada subconjunto de ESDB

Subconjunto	K	b_1	b_2
$a/d = 1,0$	5,94	0,38	0,51
$a/d = 1,5$	2,27	0,38	0,37
$a/d = 2,0$	4,04	0,28	0,53
$a/d = 2,5$	4,27	0,15	0,53
$a/d = 3,0$	1,72	0,30	0,46
$a/d = 3,5$	1,62	0,19	0,36

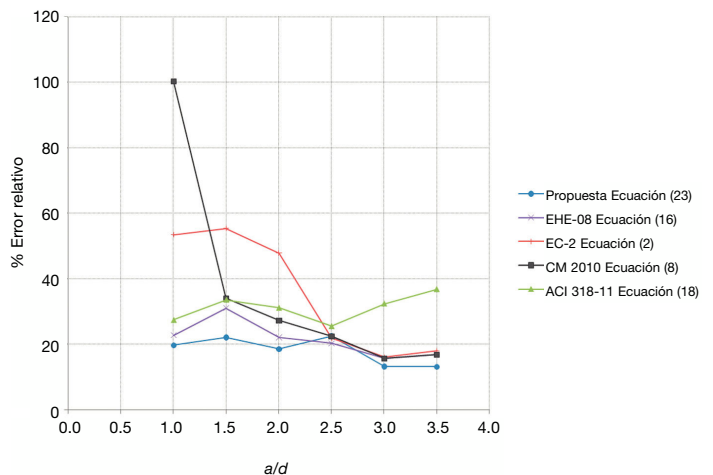


Figura 3. Errores relativos en cada modelo de regresión según relaciones a/d .

Tabla 4

Valores de las constantes resultantes de los análisis de regresión múltiple realizados por cada subconjunto de ESDB

Subconjunto	Ecuación (V_{calc})	$a/d = 1,0$	$a/d = 1,5$	$a/d = 2,0$	$a/d = 2,5$	$a/d = 3,0$	$a/d = 3,5$
n		65	73	90	91	249	52
$\mu (V_{exp}/V_{calc})$	Propuesta Ecuación (23)	0,97	1,17	1,00	0,91	1,02	1,01
	EHE-08 Ecuación (16)	1,27	1,44	1,25	1,01	1,15	1,18
	EC-2 Ecuación (2)	2,36	2,39	2,18	1,3	1,17	1,19
	CM 2010 Ecuación (8)	3,48	3,58	3,17	1,86	1,62	1,67
	ACI 318-11 Ecuación (18)	1,21	1,47	1,52	1,26	1,48	1,58
$\sigma (V_{exp}/V_{calc})$	Propuesta Ecuación (23)	0,21	0,28	0,23	0,2	0,18	0,21
	EHE-08 Ecuación (16)	0,34	0,34	0,45	0,29	0,33	0,26
	EC-2 Ecuación (2)	0,76	0,54	0,91	0,4	0,33	0,28
	CM 2010 Ecuación (8)	1,27	1,06	1,48	0,66	0,53	0,51
	ACI 318-11 Ecuación (18)	0,4	0,41	0,64	0,44	0,55	0,49
Coeficiente de variación (de Pearson)	Propuesta Ecuación (23)	0,21	0,24	0,23	0,22	0,18	0,21
	EHE-08 Ecuación (16)	0,27	0,23	0,36	0,29	0,28	0,22
	EC-2 Ecuación (2)	0,32	0,23	0,42	0,31	0,28	0,26
	CM 2010 Ecuación (8)	0,37	0,3	0,47	0,36	0,33	0,31
	ACI 318-11 Ecuación (18)	0,33	0,28	0,42	0,35	0,37	0,31
Error medio relativo $\Sigma(V_{calc} - V_{exp} \cdot 100/V_{exp})/n$	Propuesta Ecuación (23)	19,67	22,00	18,53	22,46	13,29	13,21
	EHE-08 Ecuación (16)	22,7	31,07	22,09	20,29	15,62	16,79
	EC-2 Ecuación (2)	53,54	55,44	47,94	21,85	16,09	18,02
	CM 2010 Ecuación (8)	100,36	33,96	27,26	22,43	15,68	16,79
	ACI 318-11 Ecuación (18)	27,41	33,61	31,14	25,52	32,45	36,8

la ACI 318-11. Asimismo, en el gráfico de la figura 3 se comparan los errores relativos (según eje de ordenadas) indicados en la tabla 4 por cada subconjunto de datos (en función de la relación a/d , según eje de abscisas) para los modelos de regresión analizados.

En todo caso, al igual que Zsutty, se obtienen coeficientes de variación, dispersiones y errores relativos menores evaluando el esfuerzo cortante de agotamiento mediante la expresión propuesta que mediante la expresión de los modelos del EC-2 y del CM 2010 (nivel de aproximación I) y de los deducidos de la expresiones de la EHE-08 o la ACI 318-11. Del mismo modo, considerando una clasificación por Puntos de Demérito [21], semejante a la clasificación realizada por Cladera y Marí para estudiar la bondad de los diferentes procedimientos de cálculo y, en especial, de su propuesta preliminar [22], anteriormente citada, el ajuste propuesto obtiene la mejor puntuación, por lo que se mejora el ajuste del modelo deducido del EC-2 en el que se considera la influencia de la relación a/d .

Con el modelo propuesto, el del EC-2 y el deducido de la EHE-08, se obtienen bajas dispersiones y correlaciones que se consideran aceptables para predecir la capacidad a cortante de elementos sin armadura transversal sin aplicar solicitaciones axiales. Si bien, cabe indicar que con la predicción realizada mediante el modelo propuesto se obtiene un ajuste más preciso y que los resultados de la evaluación realizada con el modelo propuesto arrojan menores dispersiones que los resultados obtenidos con el modelo deducido de la EHE-08 y con el del EC-2 para relaciones a/d superiores a 2,5.

En cuanto a los resultados obtenidos con relaciones a/d menores o iguales que 2,5, de nuevo se comprueba que las conclusiones de Zsutty son aplicables a los modelos analizados obteniendo pobres correlaciones para los subconjuntos de datos estudiados. No obstante lo anterior, con el modelo propuesto se obtienen errores máximos relativos ligeramente superiores a un 20%, los cuales además suponen una reducción de los errores relativos en un 27% respecto a los obtenidos

con el modelo deducido de las expresiones de la Instrucción EHE-08.

En concreto, en el caso del modelo del EC-2 y de la formulación considerada del CM 2010, si bien se considera adecuado contemplar el efecto arco, y lo que es más importante, contemplar dicha influencia en la evaluación de los esfuerzos solicitantes y no en la evaluación de la capacidad, se pone de manifiesto que la influencia de la relación a/d es mayor que la considerada en el modelo vigente europeo por lo que es posible reconsiderar este aspecto con bases de datos actualizadas.

En el caso del modelo del CM 2010 y del modelo deducido de la ACI 318-11, ambos arrojan resultados demasiado conservadores ($\mu_{medio} = 2,56$ y $1,42$, respectivamente), imprecisos y altamente dispersos (Coeficiente de variación medio = $0,36$ y $0,37$, respectivamente) en todos los subconjuntos de datos considerados frente al modelo propuesto ($\mu_{medio} = 1,01$ y coeficiente de variación medio = $0,21$). Es interesante observar que dichos modelos parece que han sido propuestos con cierta «hiporresistencia» sobre la capacidad real del elemento ensayado, cuya evaluación no se ha encontrado en la bibliografía consultada.

9. Verificación experimental

En el Laboratorio Central de INTEMAC se ha llevado a cabo una campaña experimental con hormigones convencionales y de altas prestaciones que se encuadró dentro de un programa de investigación (fig. 4) para [21], en el que se obtuvieron resultados para evaluar la influencia adicional de la forma de la sección y de las solicitaciones axiales de tracción en elementos sin armadura transversal. En todos los ensayos de dicha campaña se alcanzó la capacidad a esfuerzo cortante de los elementos estructurales. En la figura 5 se muestra un esquema de la disposición de ensayos (en concreto, de las vigas tipo V9 cuya cuantía de armadura longitudinal es aproximadamente igual a un 1,5%).



Figura 4. Vista general de disposición de ensayos y de rotura frente a esfuerzo cortante del ensayo V8-025.

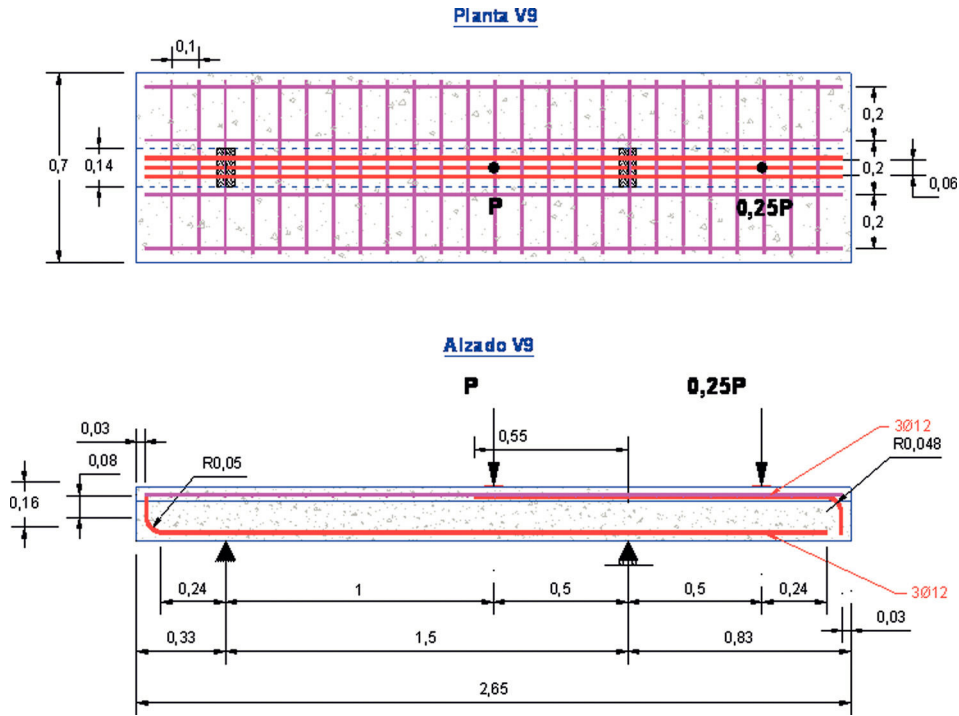


Figura 5. Esquema de disposición de ensayos tipo V9 de la campaña experimental.

El acero previsto para la armadura pasiva de los elementos estructurales fue B500SD para barras longitudinales y B500T para la malla de la losa superior. Fueron ensayos con piezas fabricadas con hormigones convencionales, cuya resistencia

característica a compresión fuera aproximadamente igual a 25 MPa, y con hormigones de altas prestaciones, cuya resistencia a compresión fuera aproximadamente igual a 80 MPa (ver valores adicionales de los materiales utilizados en la tabla 5).

Tabla 5
Características de los materiales de la campaña experimental de [21]

Denominación	Clase y marca del cemento	Contenido de cemento (kg/m³)	a/c	Consistencia	Tamaño máximo del árido (mm)	f_{ct} (MPa)	f_y (N/mm²)	f_u (N/mm²)
V8-025	CEM I 42,5 R	250	0,65	F	12	3,4	495	629
V8-080	CEM I 52,5 R	485	0,31	F	12	4,9	495	629
V9-025	CEM I 42,5 R	250	0,65	F	12	3,8	495	629
V9-080	CEM I 52,5 R	485	0,31	F	12	4,5	495	629

En la campaña experimental se pudo observar que en todos los ensayos la fisuración diagonal por cortante es independiente del desarrollo de las fisuras por el momento flector existente, la cual comenzaba desde un punto interior en la viga cuando las tensiones principales de tracción superaban la resistencia a tracción del hormigón. Se iniciaba en la fibra neutra y se propagaba hacia el punto de carga en su parte superior y hacia los apoyos en su parte inferior. Estas fisuras cortaban las fisuras previas existentes por flexión. A partir de este momento, ocurrían dos tipos de fisuraciones: una debida al cortante en el alma y otra producida por la interacción flexión-cortante. El colapso ocurría poco después de que las fisuras diagonales hubieran llegado a tener muy poca pendiente (casi horizontales). En general, las fisuras que se formaban a lo largo de las barras longitudinales se desarrollaban gradualmente y eventualmente causaban un fallo por adherencia en toda la longitud hasta el apoyo. Con el desarrollo de estas fisuras el desplazamiento relativo entre las caras de la fisura se incrementaba rápidamente.

Cabe apuntar que el estado de los áridos en el plano de rotura fue distinto entre los ensayos realizados con hormigones convencionales y los de altas prestaciones. En general, las fisuras partían el árido en los ensayos realizados con hormigones de alta resistencia, aspecto que no sucedió tan claramente en el resto de ensayos realizados con hormigones convencionales.

Se han considerado cuatro de estos ensayos, cuya sección transversal recta es constante y en forma de T (fig. 6), en los que no se aplicaban solicitaciones axiales para verificar que las estimaciones de la capacidad a cortante con los modelos incluidos en las normas vigentes tenidas en cuenta en este estudio no se corresponden adecuadamente con la resistencia real de ensayo.

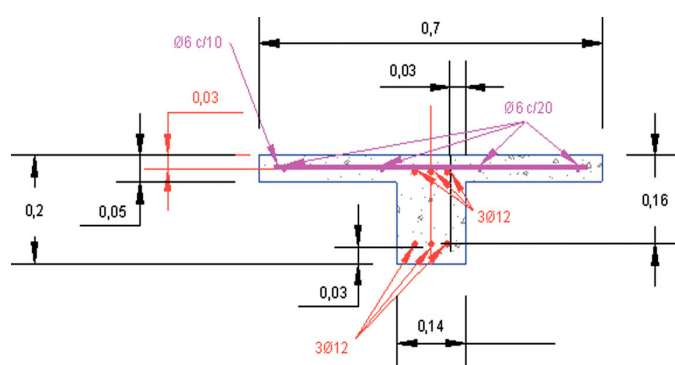


Figura 6. Sección transversal en forma de T de los ensayos tipo V9 de la campaña experimental.

En la tabla 6 se incluyen algunos datos de dichos ensayos (ver información ampliada sobre el modelo de ensayo, características de materiales y procedimiento de realización en [21]), así como la evaluación de la capacidad a cortante con la expresión propuesta (Ecuación (23)) y con la Ecuación (2) del EC-2. En el gráfico de la figura 7, en el que se comparan las estimaciones citadas (V_{calc}) y las capacidades reales (V_{exp}), se puede comprobar que el ajuste realizado en los ensayos de la campaña experimental es mejor que el del EC-2, el cual arroja resultados demasiado conservadores, tanto con hormigones convencionales como de altas prestaciones.

10. Introducción de la seguridad en el modelo propuesto

Una vez expuesto lo observado en el análisis de contraste entre las expresiones del modelo propuesto y aquellas deducidas de modelos experimentales, se puede aseverar que la expresión matemática propuesta para estimar la capacidad a cortante en elementos sin armadura transversal predice valores consistentes que presentan menor dispersión que los valores obtenidos con las distintas formulaciones de la normativa, a partir de los datos registrados en la campaña experimental realizada y los ensayos recopilados de la bibliografía consultada.

En consecuencia, una vez realizado el ajuste y tarado del modelo propuesto con los valores experimentales disponibles, se deducen los valores de cálculo de la formulación propuesta a partir de los principios de seguridad estructural indicados en la normativa vigente.

El método probabilístico que se emplea para establecer el criterio de diseño es el método de los coeficientes parciales

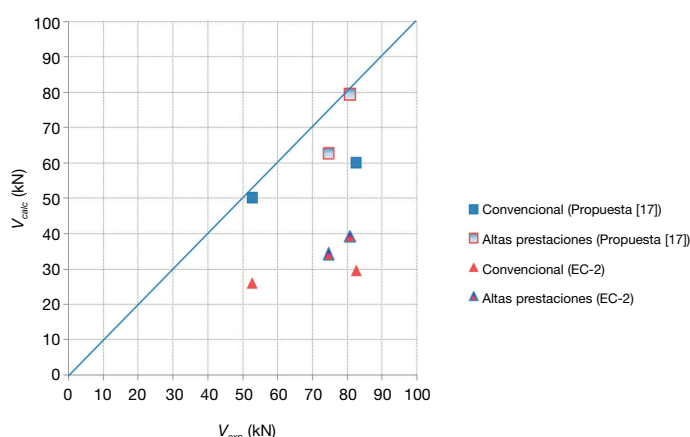


Figura 7. Comparación entre valores de ensayo y valores medios estimados con las formulaciones del EC-2 y de la propuesta [21].

Tabla 6
Ensayos de la campaña experimental de [21]

Denominación	Fecha	b_f (mm)	b_w (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	a/d	V_{exp} (kN)	V_{calc} (kN)	
									Propuesta	EC-2
V8-025	2011	700	140	164	0,98	33,6	1,9	52,74	50,15	26,07
V8-080	2011	700	140	164	0,98	75,0	1,9	74,65	62,83	34,38
V9-025	2011	700	140	164	1,47	32,9	1,9	82,69	60,10	29,62
V9-080	2011	700	140	164	1,47	76,6	1,9	80,89	77,44	39,63

descrito en el Anexo B de la norma ISO 2394. En ausencia de datos más precisos, se asume una distribución normal para las acciones y una distribución lognormal para los parámetros de resistencia.

Cabe indicar que el método de los coeficientes parciales de seguridad depende de la relación entre los efectos de las acciones variables y los efectos de las acciones permanentes. En este sentido, se realiza un cálculo de los coeficientes parciales para un valor de esta relación igual a 0,2 y otro para un valor igual a 2, tanto para hormigones convencionales como de altas prestaciones. El valor de los coeficientes de variación de las variables consideradas así como el valor de la relación entre los valores medios y característicos han sido extraídos de [23] considerando un modelo de cálculo de gran incertidumbre [21]. Se realiza el proceso iterativo indicado en [23] para obtener el coeficiente parcial de seguridad del modelo propuesto en el caso de que no exista influencia de las solicitaciones axiales y se considera suficiente un valor de γ_c igual a 1,5.

Por consiguiente, habiendo introducido la seguridad estructural en el modelo, se resume la formulación propuesta para la estimación del esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma de elementos de hormigón armado sin armadura transversal no sometidos a solicitaciones axiales en la Ecuación (25).

$$V_{u,pr} = \frac{C_{EST}}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho)^{0,5} \cdot f_c^{0,3} \cdot b_w \cdot d \quad (25)$$

donde:

$$\gamma_c = 1,5$$

$$C_{EST}' = \left[0,76 \cdot \left(\frac{a}{d} \right)^{-1,23} \right] \cdot \left[\left(\frac{b_f}{b_w} \right)^{0,14 \cdot (3 - \frac{a}{d})} \right] \text{ si } \frac{a}{d} \leq 3,0 \quad (26)$$

$$C_{EST}' = 0,08 \quad \text{si } \frac{a}{d} > 3,0 \quad (27)$$

11. Conclusiones y recomendaciones

Se ha logrado un ajuste, que incluye explícitamente la consideración de la luz a cortante (a/d), más preciso del primer término de las expresiones indicadas por la EHE-08 y el EC-2 para calcular la capacidad a cortante de elementos de hormigón armado sin armadura transversal, sin establecer recomendaciones de valores límite en las variables predictoras, mediante análisis de regresión considerando los datos de los ensayos incluidos en la base de datos recopilados en 2008 por los investigadores Collins, Benz y Sherwood. En particular:

1. Aunque la EHE-08, el EC-2, el CM 2010 y la ACI 318-11 reproducen y predicen adecuadamente en forma cualitativa el fenómeno de la resistencia última a cortante a partir de formulaciones distintas, sus resultados finales cuantitativos no son coincidentes según se desprende de la comparación realizada.

2. El modelo propuesto no establece un valor de cortante mínimo, si bien se considera necesaria una mayor investigación experimental en elementos de hormigón armado con bajas cuantías y grandes cantos, tanto en hormigones convencionales como de altas prestaciones.
3. Para relaciones a/d superiores a 2,5 se obtienen errores relativos mínimos, bajas dispersiones y correlaciones que se consideran aceptables con los modelos europeos considerados. Si bien, cabe indicar que la predicción realizada con el modelo propuesto obtiene un ajuste más preciso y que arroja menores dispersiones que con el modelo deducido de la Instrucción española y del Eurocódigo.
4. En cuanto a los resultados obtenidos con relaciones a/d menores o iguales que 2,5, se comprueba que con el modelo propuesto se obtienen errores máximos relativos ligeramente superiores a un 20%, los cuales son admisibles y además suponen una reducción de los errores relativos en un 27% respecto a los obtenidos con el modelo deducido de la Instrucción EHE-08, el cual arroja pobres correlaciones y no se puede considerar consistente.
5. Específicamente, la influencia de la relación a/d es mayor que la considerada en el modelo vigente europeo y, dada las bases de datos existentes revisadas y actualizadas, es posible reconsiderar la valoración de la influencia del efecto arco.
6. En ocasiones, la escasez de ensayos no permite una correcta evaluación de la influencia determinante de algunos parámetros (forma de la sección, bajas cuantías, hormigones de altas prestaciones,...) sin establecer valores límite en las normas, lo que debería ser reconsiderado con bases de datos actualizadas o con investigación experimental adicional.
7. El modelo propuesto por el CM 2010 y el modelo deducido de la ACI 318-11 arrojan resultados demasiado conservadores, imprecisos y altamente dispersos.

En resumen, se pone de manifiesto la bondad de un modelo cuyas expresiones propuestas para estimar el esfuerzo cortante se consideran adecuadas para el dimensionamiento y comprobación de elementos de hormigón armado sin armadura transversal. El establecimiento de la aplicación del modelo propuesto satisface las exigencias de resistencia establecidas en la normativa europea, al menos con el mismo nivel de garantía.

Agradecimientos

A la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid y a INTEMAC, especialmente a todo el equipo que ha colaborado directamente en la realización de este trabajo, del que puede obtenerse información complementaria en [21].

Bibliografía

- [1] Muttoni A. Applicability of the theory of plasticity for dimensioning reinforced concrete. PhD thesis. ETH Zurich Birkhäuser; 1990.
- [2] Vecchio FJ, Collins MP. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Structural Journal. 1986;83:219-32.

- [3] Cladera A. Cálculo a cortante de vigas de hormigón de alta resistencia. Tesis Doctoral dirigida por D. Antonio Marí Bernat. Barcelona: Universidad Politécnica; 2002.
- [4] Osses-Henriquez CE. Advancements of the disturbed stress field model. PhD thesis. Washington University; 2007.
- [5] EN 1992-1-1:2. Eurocode 2. Concrete Structure. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, Management Centre; 2004.
- [6] EHE 08. Instrucción de Hormigón Estructural. Madrid: Ministerio de Fomento; 2008.
- [7] Model Code 2010. Final Draft. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete; 2012.
- [8] ACI 318-11: Building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington Hills, Michigan: Committee 318, American Concrete Institute; 2008.
- [9] Collins P, Benz C, Sherwood EG. Where is shear reinforcement required? A review of research results and design procedures. *ACI Structural Journal*. 2008;105:590-600.
- [10] Rimmel G. Zum Zugtragverhalten hochfester Betone und seinem Einfluß Querkrafttragfähigkeit von schlanken Bauteilen ohne Schubbewehrung. Dissertation. Darmstadt: Technische Hochschule; 1992.
- [11] Zsutty TC. Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data. *ACI Structural Journal*. 1968;65:943-51.
- [12] Código Modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural. GEHO-CEB; 1995.
- [13] König G, Fischer J. Model uncertainties concerning design equations for the shear capacity of concrete members without shear reinforcement. *Bulletin d'information n° 224: Model Uncertainties*, CEB. 1995;224: 49-100.
- [14] Fernández-Montes D, González-Valle E. Análisis y evaluación de los modelos de comprobación a cortante de elementos de hormigón armado, sin armadura transversal, solicitados a tracción. *Hormigón y Acero*. 2011;62:79-91.
- [15] Hedman O, Losberg A. Design of concrete structures with regard to shear forces. *Bulletin d'information: Shear and torsion*, CEB. 1978;126: 49-100.
- [16] Ferguson P, Thompson JN. Diagonal tension in T-beams without stirrups. *ACI Journal Proceedings*. 1953;49:665-75.
- [17] Zararis IP, Karaveziroglou MK, Zararis PD. Shear Strength of Reinforced Concrete T-Beams. *ACI Structural Journal*. 2006;103:693-700.
- [18] Bairán JM, Marí AR, Romia V, Ametller J. Resistencia cortante-axil de tracción y compresión en hormigón armado. IV Congreso ACHE de Estructuras (Libro resúmenes y Formato Digital). Valencia: ACHE; 2004.
- [19] Haddadin MJ, Hong S, Mattock AH. Stirrup effectiveness in reinforced concrete beams with axial force. *Journal of the Structural Division*. 1971; 97:2277-97.
- [20] Walraven JC. Background document for EC-2, Chapter 6.2, Shear. Brussels: CEN; 2002.
- [21] Fernández-Montes D. Influencia de las solicitaciones axiales de tracción en la resistencia a cortante de las viguetas de forjado sin armadura transversal. Tesis Doctoral dirigida por D. Enrique González Valle. Madrid: Universidad Politécnica; 2011.
- [22] Cladera Bohigas A, Marí Bernat A. Borrador n.º 1: Propuesta preliminar para el cálculo del ELU de cortante y torsión. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña; 2003.
- [23] Östlund L. An estimation of γ -values. *Bulletin d'information: Reliability of concrete structures*, CEB. 1991;202:49-100.

1. Datos del congresista

Nombre y Apellidos		DNI
<input type="text"/>		<input type="text"/>
Empresa o Centro Universitario		
<input type="text"/>		
Dirección		C.P.
<input type="text"/>		<input type="text"/>
Ciudad	Provincia	País
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
E- Mail	Tel.	Fax
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

3. Inscripción al congreso

<input type="checkbox"/> Inscripción básica (Antes del 16 de Abril)	675,00 € + IVA	816,75 €
<input type="checkbox"/> Inscripción básica (A partir del 16 de Abril)	750,00 € + IVA	907,50 €
<input type="checkbox"/> Inscripción estudiante ⁽¹⁾ (No incluye comida/Cena inauguración)	250,00 € + IVA	302,50 €
<input type="checkbox"/> Inscripción investigador ⁽²⁾	450,00 € + IVA	544,50 €
<input type="checkbox"/> Inscripción miembro ACHE/pagada entidad miembro ACHE (Antes del 16 de Abril)	580,00 € + IVA	701,80 €
<input type="checkbox"/> Inscripción miembro ACHE/pagada entidad miembro ACHE (A partir del 16 de Abril)	640,00 € + IVA	774,40 €
<input type="checkbox"/> Inscripciones pagadas por una misma entidad Siempre que sean más de 2, (Antes del 16 de Abril)	580,00 € + IVA	701,80 €
<input type="checkbox"/> Inscripciones pagadas por una misma entidad (+2) Siempre que sean más de 2, (A partir del 16 de Abril)	640,00 € + IVA	774,40 €
<input type="checkbox"/> Inscripciones pagadas por una misma entidad (+2) Siempre que sean más de 2, Miembro de ACHE (Antes del 16 de Abril)	490,00 € + IVA	592,90 €
<input type="checkbox"/> Inscripciones pagadas por una misma entidad (+2) Siempre que sean más de 2, Miembro de ACHE (A partir del 16 de Abril)	540,00 € + IVA	653,40 €
<input type="checkbox"/> Libro de resúmenes (Blanco y negro) Indique idioma: Inglés Español	40,00 €	41,60 €
<input type="checkbox"/> Libro de resúmenes (Color) Indique idioma: Inglés <input type="checkbox"/> Español <input type="checkbox"/>	65,00 € +	67,60 €
TOTAL		

2. Datos de facturación (sólo si difieren de los anteriores)

Empresa o Centro Universitario		NIF
<input type="text"/>		<input type="text"/>
Dirección		C.P.
<input type="text"/>		<input type="text"/>
Ciudad	Provincia	País
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
E- Mail	Tel.	Fax
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

⁽¹⁾ Estudiantes nacidos después de 1983, que acrediten su edad y estar cursando estudios de Primer o Segundo Ciclo, Grado o Máster.

⁽²⁾ Investigadores que presenten credencial de becario.

* Todas las cuotas de inscripción llevan incluido el 21% de IVA, a excepción de los libros, sujetas al 4% de IVA.

* El libro de resúmenes en formato digital (pdf) está incluido en la cuota del congreso.

4. Forma de pago

<input type="checkbox"/> Transferencia bancaria
BANCO ESPAÑOL DE CRÉDITO Plaza República de Ecuador, 7 - 28016 Madrid Cuenta nº 0030 1125 13 0001038271 IBAN ES31 0030 1125 1300 0103 8271 (Imprescindible adjuntar comprobante de pago por correo o e-mail)

Enviar formulario a:

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Laboratorio de Estructuras - Av. Profesor Aranguren s/ n
Ciudad Universitaria - 28040 Madrid
Teléfono: 91 336 66 98
info@e-ache.net

Fecha

Firma