

# Estudio experimental de resistencia a cortante en vigas continuas de hormigón armado, con y sin armadura de cortante, tras el desarrollo de rotaciones

*Experimental study of shear strength in continuous reinforced concrete beams, with and without shear reinforcement, after development of rotations*

Andrea Monserrat López<sup>a</sup>, Pedro Fco. Miguel Sosa<sup>b</sup>, José Luis Bonet Senach<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València, Estudiante de doctorado, anmonlo6@upv.es

<sup>b</sup> Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València, Catedrático de Universidad, pmiguel@cst.upv.es

<sup>c</sup> Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València, Catedrático de Universidad, jlbonet@cst.upv.es

## RESUMEN

Se presenta un programa experimental para el estudio de la resistencia a cortante de vigas continuas de hormigón armado, sin estribos y con distintas cuantías de armadura de cortante, en las que se desarrollan redistribuciones de esfuerzos de flexión que requieren de grandes rotaciones en las zonas de máximo cortante. Los resultados muestran que la contribución del hormigón a la resistencia a cortante disminuye, por una parte, con el aumento de la cuantía de armadura transversal dispuesta y, por otra, con el aumento de la rotación de flexión desarrollada por vigas con la misma armadura transversal.

## ABSTRACT

This paper presents an experimental programme to study shear strength of reinforced concrete continuous beams, without stirrups and with different amounts of shear reinforcement, in which redistributions of flexural efforts are developed demanding large rotations in the zones of maximum shear. The results show that the concrete contribution to the shear strength decreases, on the one hand, with increasing amount of transversal reinforcement and, on the other one, with increasing bending rotation developed by beams with the same shear reinforcement ratio.

**PALABRAS CLAVE:** resistencia a cortante, hormigón armado, viga continua, rótula plástica, rotación.

**KEYWORDS:** shear strength, reinforced concrete, continuous beam, plastic hinge, rotation.

## 1. Introducción

El comportamiento a cortante en estructuras de hormigón armado ha sido objeto de estudio mediante el desarrollo de extensas campañas experimentales durante los últimos 70 años. Sin embargo, la inmensa mayoría de estos ensayos experimentales de cortante han sido realizados

en vigas simplemente apoyadas [1–4]. Sin embargo, muchas estructuras reales, como son algunos tableros de puentes, no se corresponden con esa tipología estructural. Se trata de vigas continuas que, al ser estructuras hiperestáticas, presentan un comportamiento estructural

distinto al de las vigas biapoyadas. Además de la importante interacción flector-cortante que se produce en los apoyos internos y la existencia de un punto de contraflexión en el vano, las vigas continuas tienen características de continuidad y redundancia que permiten la redistribución de esfuerzos de flexión tras la plastificación del armado longitudinal. Este comportamiento estructural abre la posibilidad de que la rotura por cortante se alcance antes de que se produzca la plastificación de la armadura o tras la formación de una rótula plástica en el entorno de un apoyo interno. En este segundo caso, un aumento de la carga a partir de la formación de la rótula plástica aumenta el cortante a la vez que reduce la resistencia a cortante de la zona debido al incremento de la deformación plástica de la rótula. La rotura puede alcanzarse antes de que se generen el conjunto de rótulas plásticas que convierten la estructura en un mecanismo o tras alcanzar la máxima capacidad a flexión de la estructura. Si se alcanza esta máxima carga, la rotura también puede producirse por cortante, ya que, aunque el cortante no aumente, la deformación de la rótula plástica sigue reduciendo la capacidad resistente a cortante.

Este fenómeno de interacción entre las rotaciones plásticas y la resistencia frente a cortante en las rótulas plásticas puede interpretarse como una reducción de la capacidad de rotación de las rótulas plásticas debido a la presencia de las fuerzas de cortante.

La reducción de la capacidad de rotación en elementos de hormigón armado sin armadura de cortante ha sido demostrada teóricamente por la Teoría de la Fisura Crítica (CSCT) [5] y verificada experimentalmente por Vaz Rodrigues et al. [6] en el caso de vigas de hormigón armado sin armadura de cortante con roturas a cortante posteriores a la plastificación del armado longitudinal. Los ensayos recogidos en la citada campaña experimental ensayan vigas simplemente apoyadas con un voladizo extremo que permite la simultaneidad de momento flector negativo en las zonas de máximo cortante

en el apoyo de la viga y la existencia de un punto de contraflexión de la ley de momentos flectores en el vano de la misma, sin embargo, no reproducen las características de continuidad y redundancia de las vigas continuas.

El efecto del momento flector en la resistencia a cortante, o la interacción flector-cortante, se considera en modelos teóricos asentados tales como la *Modified Compression Field Theory* (MCFT) [7, 8], base de la formulación de diseño a cortante en el Código Modelo 2010 [9], o la Teoría de la Fisura Crítica (CSCT) [5, 10], implementada en el código de diseño suizo SIA 262 [11]. En ambos casos se considera una disminución de la resistencia a cortante de un elemento como consecuencia del efecto del momento flector concomitante, que se evalúa mediante el valor de la deformación longitudinal del hormigón en el punto medio del alma, limitada en cualquier caso al límite elástico del acero en el cordón traccionado [9]. Esta limitación impide que estos modelos se apliquen para zonas en las que se desarrollan deformaciones plásticas como las descritas anteriormente para las vigas continuas. A pesar de ellos, estos modelos han demostrado una mejor capacidad de predicción de la resistencia a cortante [5, 12, 13] que las formulaciones de diseño basadas en expresiones empíricas, como las recogidas en el Eurocódigo 2 [14] o el ACI 318-19 [15].

Además de la falta de consenso existente en los códigos de diseño en relación al empleo de formulaciones basadas en modelos teóricos [9] o en expresiones empíricas [14, 15], también se observan importantes discrepancias en el tratamiento de la resistencia a cortante en elementos con estribos en cuanto a la consideración o no de la resistencia atribuida al hormigón. Mientras que el Código Modelo 2010 [9] y el ACI 318-19 [15] consideran la resistencia a cortante proporcionada por el acero de los estribos y por el hormigón, el Eurocódigo 2 [14] únicamente considera la atribuida a la armadura de cortante.

En este trabajo se presenta un programa experimental para el estudio de la resistencia a cortante de vigas continuas de hormigón armado en las que se desarrollan redistribuciones de esfuerzos que requieren de grandes rotaciones en las zonas de máximo cortante.

## 2. Programa experimental

### 2.1 Objetivo

El principal objetivo de este estudio es analizar la influencia de la rotación desarrollada por las rótulas plásticas en la resistencia a cortante de vigas continuas de hormigón armado con armadura de cortante. La respuesta a cortante se estudia para vigas sin estribos y con distintas cuantías de armadura de cortante.

Para ello, se ha diseñado un innovador sistema de ensayos que permite alcanzar roturas de las zonas críticas de cortante con diferentes magnitudes de rotación.

Debido a que la reducción de la capacidad resistente a cortante por la presencia de rotaciones se atribuye a la reducción de la componente resistente proporcionada por el hormigón (suma de los efectos resistentes no atribuibles a la armadura de cortante), en este estudio se analiza la evolución de las dos componentes de la resistencia a cortante, la atribuida al hormigón y la atribuida al acero, en función de la rotación desarrollada por la viga y de la cuantía de armadura transversal de la misma.

### 2.2 Especímenes

El programa experimental está constituido por un total de 15 vigas y 30 ensayos de cortante, ya que cada una de las vigas se ensaya dos veces: un ensayo de voladizo (*cantilever experiment*, CE) (FIG) y un ensayo de vano (*span experiment*, SE) (FIG). Los CE reproducen el comportamiento estructural de una viga en voladizo (estructura

isostática) y los SE los de una viga continua (estructura hiperestática).

Las vigas B1 a B9 tienen una longitud total de 9.00 m, mientras que las vigas B10 a B15 miden un total de 7.00 m. Todas ellas son de sección rectangular, de 250 x 450 mm.

Se consideran tres cuantías de armadura transversal distintas: 1) sin armadura de cortante (R0), 2) cuantía de armadura transversal  $\rho_w = 0.13\%$  o  $\phi 8/30$  (R1) y 3) cuantía de armadura transversal  $\rho_w = 0.20\%$  o  $\phi 8/20$  (R2). Por otra parte, se disponen tres diseños distintos de armadura longitudinal según la disposición en la capa superior o inferior de armado de un total de 12 barras de acero de 20 mm de diámetro: 1) cuantía de armadura  $\rho = 1.63\%$  (S1), 2) cuantía de armadura  $\rho = 2.29\%$  (S2) y 3) cuantía de armadura  $\rho = 1.94\%$  (S3). Finalmente, tanto para los CE como para los SE, las vigas se ensayan con tres esbelteces distintas, que se consiguen modificando la posición de los apoyos y de las cargas aplicadas. En los CE (Figura 1.a), las longitudes del voladizo  $l_1$  son 1.00, 1.62 y 2.31 m. En los SE (Figura 1.b), las longitudes totales del vano  $l_2$  son 4.00, 5.00 y 6.00 m y la del voladizo  $l_3$  1.00 m en todos los casos. En la Tabla 1 se recoge el detalle de la armadura y la geometría de todas las vigas del programa experimental.

Cada uno de los 30 ensayos del programa experimental se identifica mediante un código de cuatro términos que permite identificar el valor de las variables del ensayo, tales como: 1) viga de ensayo (B1 a B15) y tipología de ensayo (C para los CE y S para los SE), 2) armadura de cortante (R0, R1 o R2), 3) armadura longitudinal (S1, S2 o S3) y 4) longitud del voladizo o vano de ensayo. Por ejemplo, el ensayo B1S-R1-S1-L6 es el ensayo de vano de la viga B1, teniendo ésta una cuantía de armadura de cortante de 0.13%, una de armadura longitudinal de 1.63% y una longitud total del vano de ensayo de 6.00 m.

El acero de las armaduras es de tipo B500SD y el hormigón tiene una resistencia a compresión de diseño de 30 MPa.

### 2.3 Sistema de ensayos

La disposición de los puntos de carga y de apoyo en los CE y los SE está recogida en la Figura 1.a y Figura 1.b, respectivamente.

En los CE, la carga  $P_1$  se aplica con control de desplazamiento hasta alcanzar la rotura en el voladizo y la carga  $P_2$  con control de carga para obtener una reacción nula en el apoyo  $B$ .

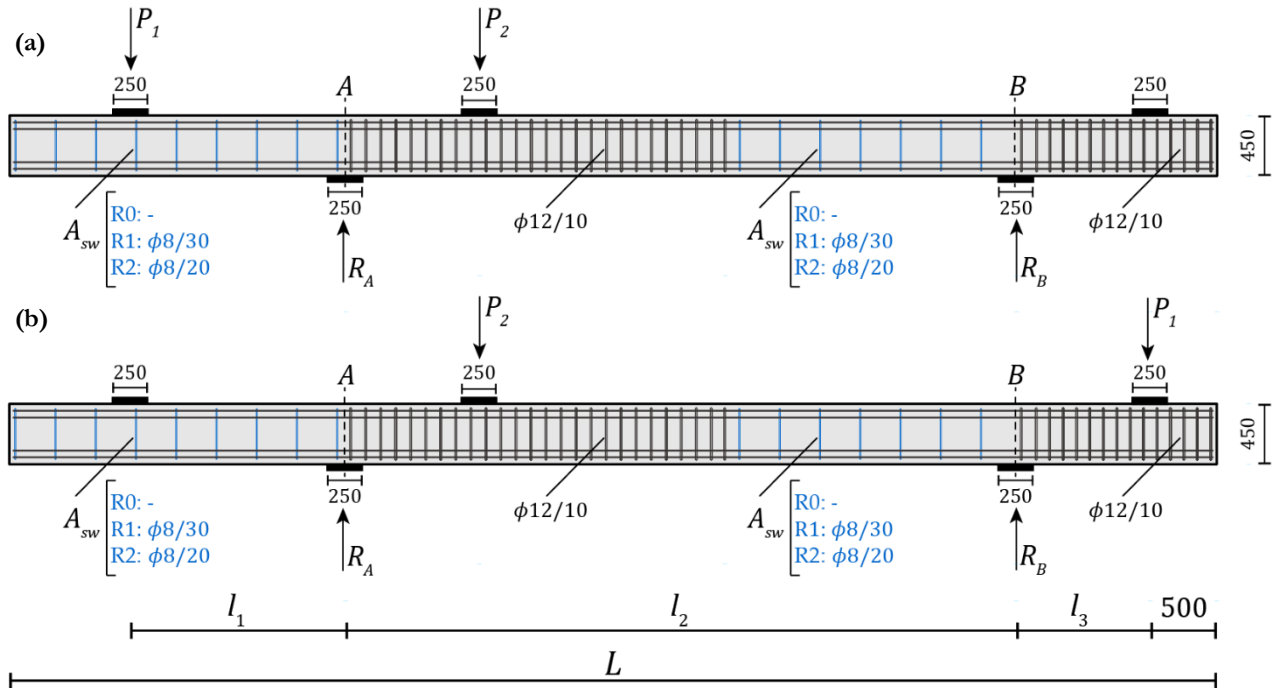


Figura 1. Detalle de la geometría y la armadura transversal: (a) ensayo de voladizo (CE); (b) ensayo de vano (SE). (Cotas en mm).

Tabla 1. Armadura y geometría de las vigas del programa experimental.

Viga	Armadura longitudinal			Armadura transversal		$L$ (m)	CE			SE		
	$A_s$	$A'_s$	$\rho$ (%)	$A_{sw}$	$\rho_w$ (%)		$l_1$ (m)	$l_2$ (m)	$l_3$ (m)			
B1	5 $\phi$ 20	7 $\phi$ 20	1.63	$\phi$ 8/30	0.13	9.00	1.00	6.00	1.00			
B2	7 $\phi$ 20	5 $\phi$ 20	2.29	$\phi$ 8/30	0.13	9.00	1.00	6.00	1.00			
B3	6 $\phi$ 20	6 $\phi$ 20	1.94	$\phi$ 8/30	0.13	9.00	1.00	6.00	1.00			
B4	5 $\phi$ 20	7 $\phi$ 20	1.63	$\phi$ 8/30	0.13	9.00	1.62	5.00	1.00			
B5	7 $\phi$ 20	5 $\phi$ 20	2.29	$\phi$ 8/30	0.13	9.00	1.62	5.00	1.00			
B6	6 $\phi$ 20	6 $\phi$ 20	1.94	$\phi$ 8/30	0.13	9.00	1.62	5.00	1.00			
B7	5 $\phi$ 20	7 $\phi$ 20	1.63	$\phi$ 8/30	0.13	9.00	2.31	4.00	1.00			
B8	7 $\phi$ 20	5 $\phi$ 20	2.29	$\phi$ 8/30	0.13	9.00	2.31	4.00	1.00			
B9	6 $\phi$ 20	6 $\phi$ 20	1.94	$\phi$ 8/30	0.13	9.00	2.31	4.00	1.00			
B10	5 $\phi$ 20	7 $\phi$ 20	1.63	-	-	7.00	1.00	4.00	1.00			
B11	7 $\phi$ 20	5 $\phi$ 20	2.29	-	-	7.00	1.00	4.00	1.00			
B12	6 $\phi$ 20	6 $\phi$ 20	1.94	-	-	7.00	1.00	4.00	1.00			
B13	5 $\phi$ 20	7 $\phi$ 20	1.63	$\phi$ 8/20	0.20	7.00	1.00	4.00	1.00			
B14	7 $\phi$ 20	5 $\phi$ 20	2.29	$\phi$ 8/20	0.20	7.00	1.00	4.00	1.00			
B15	6 $\phi$ 20	6 $\phi$ 20	1.94	$\phi$ 8/20	0.20	7.00	1.00	4.00	1.00			

\*Nota:  $A_s$  es el área de armadura longitudinal a tracción,  $A'_s$  es el área de armadura longitudinal a compresión,  $A_{sw}$  es el área de armadura transversal.

En los SE, la aplicación de las carga  $P_1$  y  $P_2$  se realiza en dos fases. En la primera fase, la carga  $P_1$  se aplica con control de desplazamiento y la carga  $P_2$  con control de carga para obtener una reacción nula en el apoyo  $A$ . Esta fase finaliza cuando la armadura longitudinal superior en la sección del apoyo  $B$  plastifica. En la segunda fase, la carga  $P_2$  se aplica con control de desplazamiento y la carga  $P_1$  con control de carga para mantener bloqueado el giro alcanzado en la sección del apoyo  $B$  al final de la primera fase.

Una explicación más detallada de las distintas fases de los SE, así como el detalle del sistema de reacciones y cargas diseñado para la ejecución del programa experimental está recogido en Monserrat-Lopez et al. [16].

## 2.4 Instrumentación

Durante el desarrollo de los ensayos se registran mediciones continuas de las cargas y reacciones con cuatro células de carga, de las deformaciones en el acero con galgas extensiométricas y de las deformaciones en el hormigón con transductores de desplazamiento [16].

Además, se emplea la técnica de correlación digital de imágenes (*Digital Image Corellation*, DIC) para la medición de desplazamientos y la obtención de deformaciones en una de las caras laterales de las vigas. Las fotografías se toman con cámaras digitales Canon EOS 5D Mark II (2.1 Mpx) equipadas con lentes de enfoque fijo. Estas cámaras, sincronizadas con el equipo de adquisición de datos, toman fotografías cada 2 o 3 segundos. Para la correcta obtención de los desplazamientos, se corrigen los errores de medida causados por la propia curvatura de la lente y la proyección con una calibración única para cada cámara en cada ensayo. Finalmente, se procesan las imágenes obtenidas con un software propio desarrollado en el ICITECH de la Universitat Politècnica de València. Este software rastrea facetas de un tamaño de 100 x

100 px entre imágenes sucesivas para establecer el desplazamiento real con un error máximo de  $1/32$  px.

## 3. Tipos de rotura

En todos los ensayos se alcanza la rotura a cortante excepto el ensayo B7C-R1-S1-L2.3, que rompe a flexión. Sin embargo, se producen distintas respuestas estructurales según las características del ensayo.

### 3.1 Ensayos de voladizo (CE)

Todas las vigas, excepto la B8 y B9, rompen a cortante antes de la plastificación de la armadura longitudinal. En el caso de los ensayos B8C-R1-S2-L2.3 y B9C-R1-S3-L2.3 la rotura a cortante se alcanza después de la plastificación, con un aumento de las deformaciones bajo carga constante.

### 3.2 Ensayos de vano (SE)

La rotura a cortante en todas las vigas se alcanza tras la plastificación de la armadura longitudinal en la sección del apoyo  $B$  y el posterior bloqueo del giro en la misma. Por lo tanto, la rótula plástica desarrolla una rotación impuesta hasta alcanzar la rotura que se produce con niveles de deformaciones plásticas.

Sin embargo, se producen las dos tipologías de rotura a cortante características de las vigas continuas tras alcanzar la plastificación del armado longitudinal y que han sido expuestas anteriormente: 1) rotura durante el aumento del cortante, previa al desarrollo de todas las posibles rótulas plásticas y 2) rotura con un valor constante del cortante tras el desarrollo de todas las rótulas plásticas, es decir, tras alcanzar la máxima capacidad a flexión de la viga.

Las vigas B4 y B7 a B15 rompen a cortante cerca del apoyo  $B$  en la segunda fase del SE, tras la formación de la rótula plástica de la sección del apoyo  $B$ , mientras se produce el

aumento de la carga aplicada  $P_2$  y, por lo tanto, del cortante.

Las vigas B1, B2, B3, B5 y B6 rompen a cortante cerca del apoyo  $B$  en la segunda fase del SE, pero tras la formación de una segunda rótula plástica al plastificar el armado longitudinal inferior en la sección de aplicación de la carga  $P_2$ . Por lo tanto, la viga rompe a cortante tras el desarrollo de todas las posibles rótulas plásticas (dos) y con un valor del cortante constante.

Para los ensayos B9S-R1-S3-L4 (1 rótula plástica) y B3S-R1-S3-L6 (2 rótulas plásticas), se muestra en la Figura 2 la evolución del cortante ( $V$ ) en la sección a  $d/2$  del apoyo  $B$ , el momento flector ( $M_1$ ) en la sección a  $d/2$  del apoyo  $B$  y el momento flector ( $M_2$ ) en la sección a  $d/2$  de la sección de aplicación de la carga  $P_2$  ( $d$  es el canto útil de la sección) respecto a la flecha de la viga ( $\delta_2$ ) en la sección de aplicación de la carga  $P_2$ . Los esfuerzos representados incluyen el peso propio de la viga.

## 4. Resultados

### 4.1 Resistencia a cortante

En la Tabla 2 se recogen los principales resultados de los ensayos.  $V_R$  es la resistencia a cortante de la viga en el correspondiente ensayo, obtenida en la sección a  $d/2$  del apoyo  $A$  en los CE y del apoyo  $B$  en los SE (incluye el peso propio).  $V_{R,s}$  y  $V_{R,c}$  son las resistencias a cortante atribuidas a la armadura de cortante y al hormigón, respectivamente. Finalmente,  $\psi$  es la rotación de flexión de la viga en rotura.

La resistencia a cortante proporcionada por la armadura transversal ( $V_{R,s}$ ) se obtiene como suma de las fuerzas de tracción desarrolladas por los estribos interceptados por la fisura crítica de cortante. Para ello, la tensión alcanzada en rotura por cada uno de los estribos se calcula siguiendo el procedimiento establecido en Campana et al. [17] y considerando los valores de abertura de fisura (abertura en los puntos

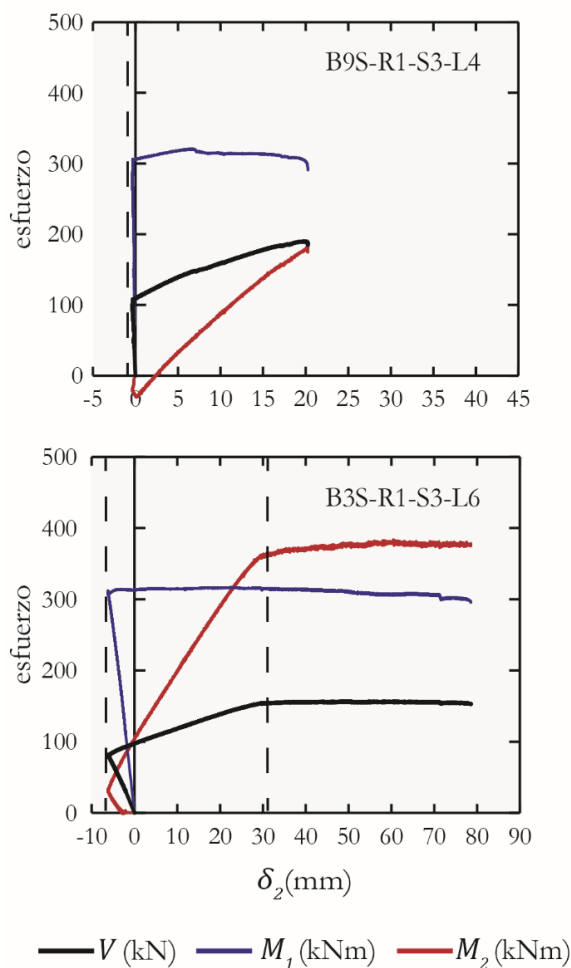


Figura 2. Evolución de esfuerzos versus flecha de la viga en la sección de aplicación de la carga  $P_2$  para los ensayos B9S-R1-S3-L4 y B3S-R1-S3-L6.

donde la fisura crítica intercepta a los estribos) obtenidos mediante la técnica de DIC. Aquellos estribos interceptados por la rama horizontal de la fisura crítica de cortante no se consideran para el cálculo de  $V_{R,s}$  [17, 18].

La resistencia a cortante proporcionada por el hormigón ( $V_{R,c}$ ) se obtiene como diferencia entre la resistencia total y la resistencia del armado transversal. La resistencia proporcionada por el hormigón representa el resto de mecanismos de transferencia y resistencia del cortante, tales como el engranamiento de áridos, la resistencia a tracción residual, el efecto pasador y la contribución del cordón comprimido.

Tabla 2. Resultados de resistencia y rotación para todos los ensayos de voladizo (CE) y de vano (SE).

Ensayo	$V_R$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,c}$ (kN)	$\psi$ (mrad)	Ensayo	$V_R$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,c}$ (kN)	$\psi$ (mrad)
B1C-R1-S1-L1	196.2	127.0	69.2	10.6	B1S-R1-S1-L6	148.9	125.7	23.2	36.4
B2C-R1-S2-L1	214.0	128.1	85.9	3.5	B2S-R1-S2-L6	150.7	112.7	38.0	35.3
B3C-R1-S3-L1	205.8	123.6	82.2	8.9	B3S-R1-S3-L6	156.6	116.7	39.9	53.8
B4C-R1-S1-L1.6	173.6	128.0	45.6	11.6	B4S-R1-S1-L5	143.2	128.3	14.9	25.3
B5C-R1-S2-L1.6	214.5	127.1	87.4	13.1	B5S-R1-S2-L5	197.3	125.6	71.7	46.2
B6C-R1-S3-L1.6	207.1	127.7	79.4	14.4	B6S-R1-S3-L5	192.5	116.8	75.7	41.3
B7C-R1-S1-L2.3	-	-	-	-	B7S-R1-S1-L4	214.1	121.2	92.9	15.7
B8C-R1-S2-L2.3	171.3	110.8	60.5	30.7	B8S-R1-S2-L4	202.4	117.6	84.8	22.6
B9C-R1-S3-L2.3	151.4	111.6	39.8	26.4	B9S-R1-S3-L4	190.1	126.7	63.4	14.8
B10C-R0-S1-L1	149.7	-	149.7	8.0	B10S-R0-S1-L4	87.6	-	87.6	11.6
B11C-R0-S2-L1	188.4	-	149.2	4.0	B11S-R0-S2-L4	103.6	-	103.6	22.3
B12C-R0-S3-L1	120.2	-	95.1	7.9	B12S-R0-S3-L4	89.2	-	89.2	7.6
B13C-R2-S1-L1	234.4	184.5	49.9	8.7	B13S-R2-S1-L4	216.0	186.2	29.8	22.1
B14C-R2-S2-L1	267.2	179.2	88.0	8.5	B14S-R2-S2-L4	233.3	SD	SD	23.9
B15C-R2-S3-L1	280.4	181.9	98.5	11.0	B15S-R2-S3-L4	208.3	177.5	30.8	24.6

\*Nota: SD (sin datos disponibles).

La rotación de flexión de la viga en rotura ( $\psi$ ) se obtiene por integración de curvaturas a lo largo de la longitud de desarrollo de la fisura crítica. Las curvaturas de flexión se calculan a partir de las deformaciones longitudinales en las fibras superiores e inferiores de la viga obtenidas mediante la técnica DIC. La longitud de integración se extiende aproximadamente hasta una distancia de  $2d$  desde la sección de apoyo (apoyo *A* en los CE y apoyo *B* en los SE) en todos los ensayos y, en el caso de los SE, cubre la zona de desarrollo de la rótula plástica.

## 4.2 Evolución de la resistencia

### 4.2.1. Cuantía de armadura transversal

La dependencia de la resistencia a cortante respecto de las distintas cuantías de armadura de cortante empleadas en el programa experimental (R0, R1 y R2) se muestra en la Figura 3. Se representan los resultados de resistencia de los ensayos comparables de acuerdo con la variable de la esbeltez, es decir, los ensayos de voladizo (CE) en los que la viga ensayada tiene una longitud de voladizo de 1.00 m (L1) y los ensayos

de vano (SE) en los que la viga tiene una longitud de vano total de 4.00 m (L4). A pesar de que existe un aumento de la resistencia a cortante total para cuantías de armadura transversal mayores (Figura 3.a), la resistencia proporcionada por el hormigón disminuye con el aumento de dicha armadura (Figura 3.b). Esto implica que los mecanismos de transferencia del cortante desarrollados por el hormigón se reducen cuando la cuantía de armadura transversal aumenta.

Por otra parte, para cada una de las cuantías representadas, la resistencia de los CE es mayor que la de los SE, tanto en el caso de la resistencia total a cortante (Figura 3.a) como de la resistencia proporcionada por el hormigón (Figura 3.b).

### 4.2.2. Rotación

La componente de la resistencia a cortante proporcionada por el hormigón ( $V_{R,c}$ ) respecto de la rotación de flexión de las vigas en rotura ( $\psi$ ) se muestra en la Figura 4. Se observa que, para una misma cuantía de armadura transversal, la resistencia atribuida al hormigón disminuye para valores crecientes de rotación.

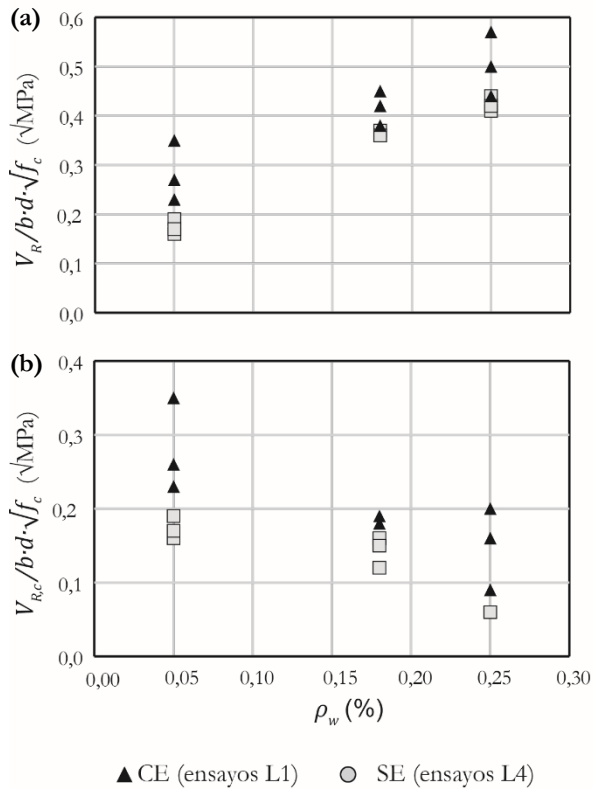


Figura 3. Resistencia a cortante según la cuantía de armadura transversal: (a) resistencia a cortante total; (b) resistencia a cortante proporcionada por el hormigón (ensayo B14S-R2-S2-L4 no incluido).

Con los resultados de los SE, se confirma que la reducción de  $V_{R,c}$  con el aumento de  $\psi$  en el caso de vigas sin armadura de cortante y con roturas tras la plastificación del armado longitudinal [6], se extiende para roturas a cortante en vigas continuas con armadura de cortante y con roturas tras la plastificación y la redistribución de los esfuerzos de flexión. Además, se observa que la reducción de esta componente de la resistencia a cortante se extiende también para rotaciones que dan lugar a deformaciones en la armadura del cordón traccionado mucho mayores que las del límite elástico.

Esta reducción de  $V_{R,c}$  con el aumento de la rotación se corresponde con el criterio de rotura enunciado por Vaz Rodrigues [6] en el caso de vigas sin armadura de cortante y que está basado en la hipótesis establecida por la CSCT [5, 10]. Esta reducción está relacionada con el aumento del ancho de fisura crítica que se

produce cuando se tienen mayores rotaciones debidas a la flexión en la zona de máximo cortante. Este incremento del ancho de fisura implica la reducción de la capacidad de transferencia del cortante por parte de los distintos mecanismos resistentes del hormigón.

Por otra parte, como se observa en la Figura 4,  $V_{R,c}$  disminuye con la cuantía de armadura transversal de la viga. La inclusión de esta variable en las formulaciones de esta componente de la resistencia a cortante podría mejorar su precisión.

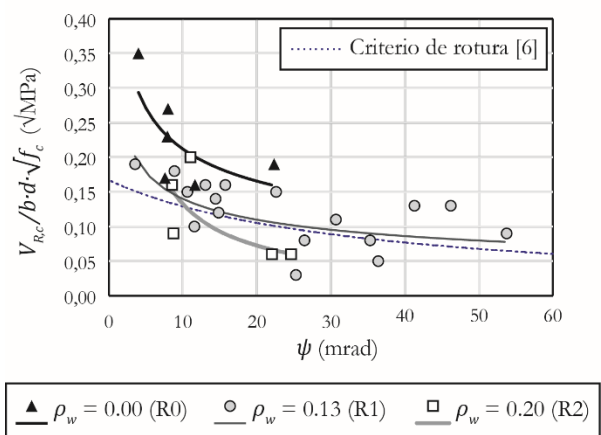


Figura 4. Resistencia a cortante proporcionada por el hormigón según la rotación de flexión de la viga en rotura para las distintas cuantías de armadura transversal (ensayos B7C-R1-S1-L2.3 y B14S-R2-S2-L4 no incluidos).

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un programa experimental de 30 ensayos a cortante. El sistema de ensayos diseñado en este programa permite realizar dos ensayos de cortante en la misma viga de hormigón armado, un ensayo en una viga en voladizo (estructura isostática) y un ensayo en una viga continua (estructura hiperestática) en que la rotura a cortante se alcanza con un aumento del cortante tras la plastificación del armado longitudinal y la redistribución de los esfuerzos de flexión, obteniendo roturas a cortante para diferentes



magnitudes de rotación por flexión en la zona de rotura. La componente de la resistencia proporcionada por la armadura transversal, así como la rotación de la flexión de la viga se calculan mediante correlación digital de imágenes (DIC). Las principales conclusiones son las siguientes:

1. Las roturas alcanzadas en todos los ensayos excepto en uno son a cortante, sin embargo, la respuesta estructural varía según el tipo de ensayo y las características de armadura transversal, armadura longitudinal y esbeltez de la viga ensayada.

2. La contribución del hormigón y del acero a la resistencia a cortante varía con la cuantía de armadura transversal de las vigas. A pesar de que la resistencia a cortante aumenta con el aumento de la cuantía de armadura transversal, la contribución del hormigón a esa resistencia disminuye.

3. Para vigas con la misma cuantía de armadura transversal, la componente de resistencia a cortante proporcionada por el hormigón disminuye con el aumento de la rotación de flexión, lo que está directamente relacionado con la interacción flexión-cortante. Además, se observa en las vigas continuas ensayadas que la reducción de esta resistencia continúa con el aumento de las rotaciones desarrolladas tras alcanzarse la deformación del límite elástico en la armadura longitudinal traccionada.

### ***Agradecimientos***

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación “Evaluación experimental de vigas continuas pretensadas, con y sin esfuerzo, y piezas compuestas de dos hormigones, para la extensión de su vida útil”, BIA2015-64672-C4-4-R. Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad la financiación del mismo centro del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los retos de la Sociedad y a la Unión Europea por el apoyo a

través de los fondos FEDER. Así mismo, los autores agradecen la ayuda concedida para la Contratación de Personal Investigador en Formación de Carácter Predoctoral, Orden 6/2015, de 9 de septiembre, de la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte (DOCV núm. 7615 de 15.09.2015).

Contratación de Personal Investigador en Formación de Carácter Predoctoral, Orden 6/2015, de 9 de septiembre, de la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte (DOCV núm. 7615 de 15.09.2015). del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los retos de la Sociedad y a la Unión Europea por el apoyo a través de los fondos FEDER. Así mismo, los autores agradecen la ayuda concedida para la Contratación de Personal Investigador en Formación de Carácter Predoctoral, Orden 6/2015, de 9 de septiembre, de la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte (DOCV núm. 7615 de 15.09.2015).

### ***Referencias***

- [1] M. D. Brown, O. Bayrak, and J. O. Jirsa, “Design for shear based on loading conditions,” *Struct. J.*, vol. 103, no. 4, pp. 541–550, 2006.
- [2] M. P. Collins, E. C. Bentz, and E. G. Sherwood, “Where is shear reinforcement required? Review of research results and design procedures,” *Struct. J.*, vol. 105, no. 5, pp. 590–600, 2008.
- [3] K.-H. Reineck, E. C. Bentz, B. Fitik, D. A. Kuchma, and O. Bayrak, “ACI-DAfStb Database of shear tests on slender reinforced concrete beams without stirrups,” *Struct. J.*, vol. 110, no. 5, pp. 867–876, 2013.
- [4] K.-H. Reineck, E. Bentz, B. Fitik, D. A. Kuchma, and O. Bayrak, “ACI-DAfStb Databases for shear tests on slender reinforced concrete beams with stirrups,” *Struct. J.*, vol. 111, no. 5, pp. 1147–1156, 2014.
- [5] A. Muttoni and M. Fernández Ruiz, “Shear strength of members without

- transverse reinforcement as function of critical shear crack width,” *ACI Struct. J.*, vol. 105, no. 2, pp. 163–172, 2008.
- [6] R. Vaz Rodrigues, A. Muttoni, and M. Fernández Ruiz, “Influence of shear on rotation capacity of reinforced concrete members without shear reinforcement,” *ACI Struct. J.*, vol. 107, no. 5, pp. 516–525, 2010.
- [7] F. J. Vecchio and M. P. Collins, “The Modified Compression-Field Theory for reinforced concrete elements subjected to shear,” *J. Proc.*, vol. 83, no. 2, pp. 219–231, 1986.
- [8] F. J. Vecchio, “Disturbed stress field model for reinforced concrete: formulation,” *J. Struct. Eng.*, vol. 126, no. 9, pp. 1070–1077, Jan. 2000.
- [9] fib, *Model Code 2010. Final Draft. Vols. 1 and 2*. 2012.
- [10] A. Muttoni, “Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement,” *ACI Struct. J.*, vol. 105, no. 4, pp. 440–450, 2008.
- [11] SIA, *Code 262 for concrete structures*. Zürich, Switzerland, 2003.
- [12] M. P. Collins, D. Mitchell, P. Adebar, and F. J. Vecchio, “A general shear design method,” *ACI Struct. Journal*, vol. 93, no. 1, pp. 36–45, 1996.
- [13] E. Bentz, F. J. Vecchio, and M. P. Collins, “Simplified Modified Compression Field Theory of calculating shear strength of reinforced concrete elements,” *ACI Struct. J.*, vol. 103, no. 4, pp. 614–624, Jan. 2006.
- [14] CEN, *EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. 2004.
- [15] ACI Committee 318, *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19); and commentary (ACI 318R-19)*. 2019.
- [16] A. Monserrat-Lopez, P. Miguel Sosa, and J. L. Bonet Senach, “Shear test on continuous reinforced concrete beams with imposed plastic rotation,” in *fib Symposium 2019. Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures*, 2019, pp. 1748–1754.
- [17] S. Campana, M. Fernández Ruiz, A. Anastasi, and A. Muttoni, “Analysis of shear-transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics,” *Mag. Concr. Res.*, pp. 386–404, 2013.
- [18] P. Huber, T. Huber, and J. Kollegger, “Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics,” *Eng. Struct.*, vol. 113, pp. 41–58, Apr. 2016.