

Estudio experimental del efecto tamaño en la resistencia a cortante de elementos de hormigón

*Experimental study of the size effect on the shear strength of concrete elements***

Fernando VARELA PUGA ^a, Manuel F. HERRADOR^b, Fernando MARTÍNEZ ABELLA ^c, Manuel PAREDES GONZÁLEZ ^d y Javier EIRAS LÓPEZ ^f

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. Personal investigador. f.varela.puga@udc.es

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. Profesor contratado doctor. manuel.herrador@udc.es

^cDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. Catedrático de Universidad.

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. Personal investigador.

^eDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. Profesor contratado doctor

RESUMEN

El comportamiento de elementos de hormigón a cortante es un tema de constante debate en el área de la ingeniería estructural. Existe gran distancia entre la realidad del fenómeno y la interpretación de las normativas. Dentro de esto el efecto tamaño se alza como uno de los aspectos a los que es necesario aportar más información empírica.

Con objetivo de mejorar el conocimiento a este respecto, el presente documento describe la campaña experimental sobre vigas de canto elevado, detallando los procedimientos llevados a cabo y los resultados conseguidos hasta la fecha.

ABSTRACT

The behaviour of concrete elements subjected to shear stress is and has been in recent time subject of constant discussion on structural engineer area. There is a great distance between the reality of the phenomenon and the standards interpretation, which tend to propose semi-empiric expressions with adjustments based on statistical analysis. Within this, size effect rises as one of the aspects needed of more empiric information.

In order to improve the knowledge in this area, hereby document describes the experimental campaign with high depth beams, detailing the procedures carried out and the results achieved to date.

PALABRAS CLAVE: ensayos, esfuerzo cortante., normativa, efecto tamaño.

KEYWORDS: tests, shear stress, standards, size effect.

1. Introducción

La evolución natural de las necesidades de la red viaria nos sitúa en un contexto en el que la estrategia sostenible no consiste siempre en el incremento de la capacidad con nuevas

estructuras. Las opciones de mantenimiento y reparación para extender la vida útil, o la ampliación o refuerzo para adaptarse a una nueva situación, pueden ser preferentes y deben

Ficha de nomenclatura

\varnothing	Diámetro
Vu	Cortante último resistido
a	Luz a cortante adimensional
b	Ancho de la viga
d	canto útil
EC	módulo de elasticidad
fck	resistencia a compresión
fti	resistencia a tracción indirecta
fs	tensión máxima del acero pasivo
fy	límite elástico del acero pasivo
h	Canto de la viga
L	longitud de la viga
ρ_{s1}	cuantía de armadura longitudinal a compresión
ρ_{s2}	cuantía de armadura longitudinal a tracción
ρ_{ω}	cuantía de armadura transversal

ser tenidas en cuenta y analizadas. Desgraciadamente, los códigos estructurales disponibles en general y en España en particular están orientados principalmente al diseño de nuevas estructuras, y presentan carencias que, a la hora de estudiar estructuras existentes, desembocan en una evaluación conservadora. Esto trae como consecuencia que muchas estructuras que podrían ser reforzadas o sencillamente mantenidas son puestas fuera de servicio cuando un análisis con herramientas más precisas, accesibles a los profesionales y no solo a los investigadores, podría servir de fundamento para adoptar la decisión más económica y eficiente con seguridad [1].

En este contexto, la formulación propuesta por las normativas respecto a la resistencia a cortante de secciones de hormigón armado se muestra excesivamente conservadora. En particular, el parámetro que pretende cuantificar la influencia de un fenómeno denominado efecto tamaño [2][3]. Este consiste en una reducción de la tensión media resistida con el aumento del canto de la dimensión representativa de la pieza; es un efecto que está descrito en la literatura pero su cuantificación

resulta muy complicada de perfeccionar debido a la dificultad de llevar a cabo ensayos a escalas representativas.

Los autores del proyecto han tenido como objetivo principal la realización de una campaña experimental capaz de aislar adecuadamente la influencia del efecto tamaño en la resistencia a cortante de elementos de hormigón. Para ello se han llevado a cabo ensayos sobre vigas de 1.00 m (SERIE S) y 1.50 m (SERIE M) de canto, con diferentes distribuciones de armadura transversal, o sin ella.

El presente documento expone de manera descriptiva la campaña experimental mencionada, argumentando acerca de las decisiones tomadas durante la misma en aras de obtener unos resultados óptimos para el estudio convenido.

2. Campaña experimental

2.1 Diseño de las vigas

Como se ha mencionado anteriormente, la intención de la campaña experimental ha sido la realización de ensayos que permitan aislar de manera adecuada el efecto tamaño. El punto de partida para esto ha sido la elección de unas bases de diseño de las vigas que permitan eliminar las variables espurias. Tendiendo esto en cuenta, las bases de diseño han sido:

-Elección de dimensiones homotéticas para las vigas, para facilitar la comparación de resultados.

-Relación entre la distancia al apoyo del punto de aplicación de carga y el canto (luz de cortante adimensional, en el entorno de 2.5 a 2.9 para evitar la aparición del efecto arco [4].

-Luz suficiente para realizar dos ensayos de cortante sobre cada una de las vigas, atendiendo a la limitación anterior sobre la luz de cortante.

-La elección de la armadura transversal tiene como referencia la armadura mínima requerida por el EC2 [4], 1.012 %. Asimismo, en

cada serie se ensaya al menos una viga con esta cuantía transversal, otra con una cuantía significativamente superior y una sin armadura transversal.

La aplicación de estos criterios ha dado lugar a un total de 7 vigas, cuyas características aparecen detalladas en la Tabla 1 y la Figura 1. Es importante destacar que en el momento de la redacción del presente documento está prevista la realización de ensayos sobre una serie de vigas de mayores dimensiones, denominada serie L, con dos metros de canto.

Nótese que se hace referencia a 3 cuantías de armadura transversal; estas aparecen en la tabla al lado del nombre de la serie y aluden al diámetro de los cercos.

Tabla 1. Dimensiones principales de las vigas ensayadas

Nombre	h (m)	b (m)	L (m)
S_T8A	1.00	0.24	6.00
S_T10A	1.00	0.24	6.00
S_T8B	1.00	0.24	6.00
S_T10B	1.00	0.24	6.00
S_NT	1.00	0.24	6.00
M_T8	1.50	0.24	9.00
M_T10	1.50	0.24	9.00

La elección de realizar el cambio de cuantía de armadura transversal mediante el cambio de diámetro de los cercos radica en minimizar la variable de la posición de los cercos

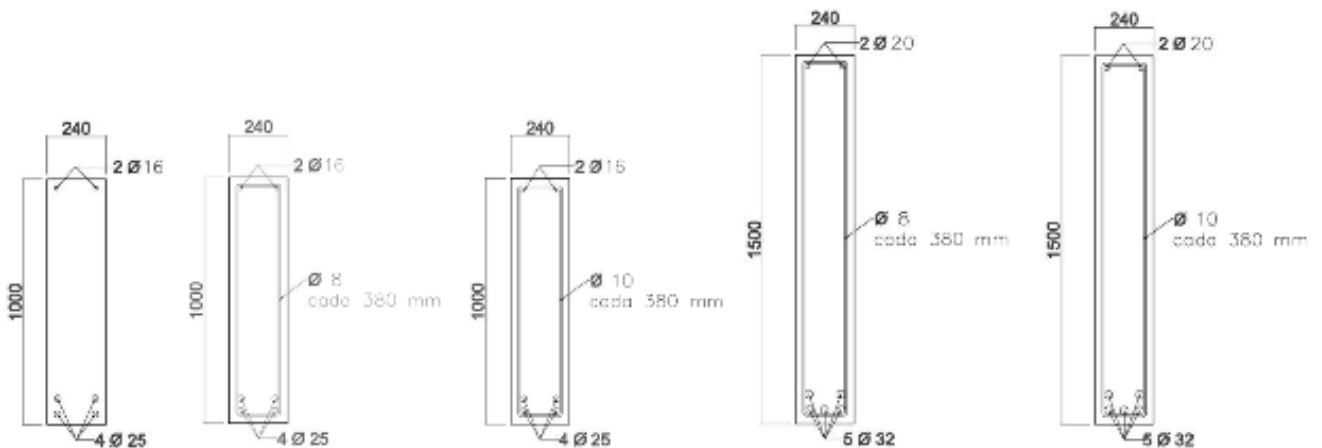


Figura 1. Diseño de las secciones del proyecto

y poder mantener la distancia en todas las series de vigas.

Tabla 2. Propiedades de las secciones de las vigas

Serie	ρ_{s1}	$\rho_{s2'}$	ρ_w	d (m)
S_T8A	0.00818	0.00168	0.001102	0.9245
S_T10A	0.00818	0.00168	0.001722	0.9225
S_T8B	0.00818	0.00168	0.001102	0.9245
S_T10B	0.00818	0.00168	0.001722	0.9225
S_NT	0.00818	0.00168	-	0.9325
M_T8	0.01117	0.00175	0.001102	1.429374
M_T10	0.01117	0.00175	0.001722	1.428373

En todas las vigas el recubrimiento es de 30 mm.

2.2 Materiales

La ejecución material del diseño de las vigas se llevó a cabo en la fábrica de prefabricados de hormigón PRECON, en Vilagarcía de Arousa (Pontevedra). Durante el proceso de fabricación se recogieron probetas de hormigón del material usado en las vigas (ver tablas 4 y 5) y barras corrugadas de los acopios y bobinas del acero usado en la armadura (ver tabla 6).

Tabla 3. Propiedades hormigón serie S

Viga	Días para ensayo	fcm día del ensayo (MPa)	fti (MPa)	EC (MPa)
S_T8A	136	55.07	4.17	31076
S_T10A	249	57.78	4.14	30937
S_T8B	327	55.16	4.12	31076
S_T10B	418	56.46	3.92	30937
S_NT	433	54.99	3.95	31076

Tabla 4. Propiedades del hormigón de la serie M

Viga	Días para ensayo	fcm a 28 días (MPa)	fcm día del ensayo (MPa)	fti a 28 días (MPa)	EC (MPa) 28 días
M_T8	57	48.21	52.50	4.38	31235
M_T10	79	48.21	52.59	4.38	31235

Por importantes inconvenientes logísticos e intentando que las probetas de hormigón permanecieran en las mismas condiciones que las vigas, en la serie S se tuvo que ajustar las fechas de caracterización a las fechas de ensayo, por ese motivo no existen datos de rotura a 28 días.

Tabla 5. Propiedades del acero pasivo

Serie	Ø (mm)	fs (MPa)	fy (MPa)
S	8	695.03	606.616
S	10	682.50	559.25
S	16	658.79	556.215
S	25	691.27	558.461
M	8	687.88	575.52
M	10	707.11	578.81

M	20	681.00	543.84
M	32	671.67	546.07

2.3 Procedimiento de ensayo y disposición del espécimen

El ensayo de un espécimen consta de 2 partes diferenciadas: fisuración y rotura. La tabla 7 muestra los parámetros de la disposición de ensayo de las diferentes vigas. Se deja constancia aquí que se decidió un cambio del sistema de ensayo tras el colapso del espécimen S_T10A, para incurrir en una rotura con menor carga de flexión.

Tabla 6. Parámetros de disposición de ensayo

Especimen	a (luz adimensional de cortante)	Vano Cortante (m)	Vano largo (m)
S_T8A	2.7	2.5	3.3
S_T10A	2.7	2.5	3.3
S_T8B	2.5	2.3	3.5
S_T10B	2.5	2.3	3.5
S_NT	2.5	2.3	3.5
M_T8	2.5	3.55	5.25
M_T10	2.5	3.55	5.25

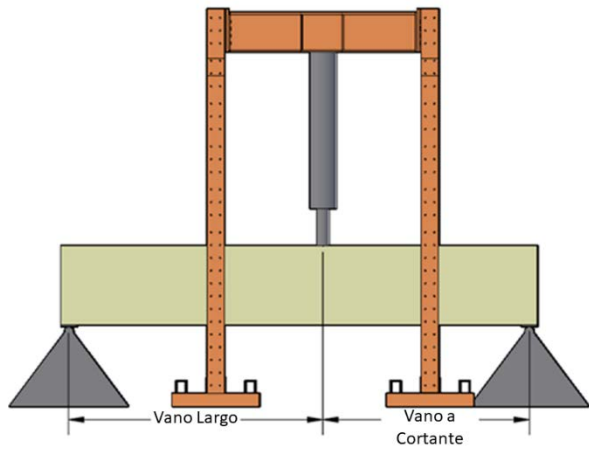


Figura 2. Disposición de ensayo

2.3.1. Fisuración

Esta parte del proceso del ensayo tiene como objetivo conocer el patrón de fisuración que tendrá la viga en el vano a cortante. En dicho vano se generará la fisura crítica que dará lugar al colapso del espécimen. Para llevarlo a cabo, se ha cargado mediante un gato hidráulico de gran capacidad por escalones de desplazamiento. Se consideró como el método más seguro de carga el control de desplazamiento, para el que se estableció una velocidad del pistón de 0.05 mm/min.

El sentido de conocer el patrón de fisuración es el de poder colocar los sensores de desplazamiento de manera óptima para estudiar la apertura de fisura.

2.3.2. Rotura

Tras llevar a cabo la fisuración y colocar en posición óptima los sensores de desplazamiento (Figura 4), se vuelve a cargar la viga mediante escalones de desplazamiento hasta colapso.

2.4 Instrumentación

Como se comentó en el apartado anterior, en un paramento lateral de la viga se colocan sensores de desplazamiento anclados mediante adhesivo pretendiendo captar en la medida de lo posible la evolución de las fisuras en el vano a cortante (ver Figura 3 y Figura 4). Además de estos sensores colocados en una de las caras laterales de la viga, bajo el punto de aplicación de carga se ha dispuesto otro sensor de desplazamiento para registrar la flecha de la viga.

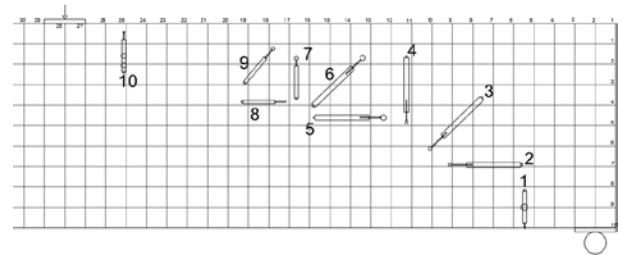


Figura 3. Ejemplo de posición de sensores antes de la fisuración en el vano a cortante

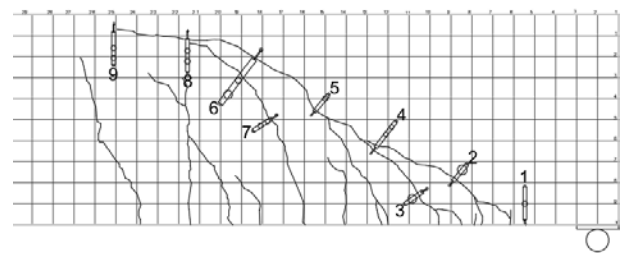


Figura 4. Reposicionamiento de sensores de desplazamiento para ensayo de rotura en el vano a cortante

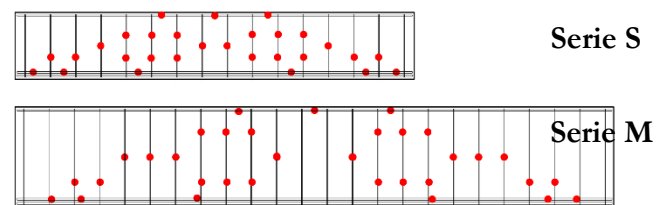


Figura 5. Posicionamiento de las galgas extensométricas en la armadura.

Además de esta instrumentación resistiva se han colocado un elevado número de galgas extensométricas en la armadura pasiva (Figura 5).

3. Resultados

Los resultados obtenidos en las vigas ensayadas hasta el momento se muestran en las Figura 6 y Figura 7 (resumidas en la Tabla 8). Es de destacar que en los ensayos realizados sobre las vigas S_T8A y S_T10A la luz de cortante adimensional utilizada ha sido de 2.7. Consecuencia de esto, el agotamiento de la viga con mayor cuantía armadura transversal fue por flexo-cortante, plastificando la armadura transversal. Tras este ensayo se decidió reducir la luz de cortante adimensional a 2.5, lo que permitió obtener una rotura a cortante de la viga S_T10B sin incurrir en el efecto arco y sin hacer plastificar la armadura inferior. Se optó por este cambio con el objetivo de analizar el cortante con una menor interacción con la flexión. De esta manera, en un futuro, se podrá obtener más información de los datos obtenidos para analizar el comportamiento de los diferentes mecanismos que actúan en la resistencia a cortante.

Tabla 7. Resumen de resultados

Viga	Carga de fisuración (kN)	Carga de rotura (kN)	Cortante último (kN)
S_T8A	438.87	622.74	354.73
S_T10A	591.41	714.61	407.06
S_T8B	463.51	546.25	328.571
S_T10B	552.00	709.08	426.528
S_NT	-	213.38	128.35
M_T8	616.19	837.48	497.40
M_T10	460.95	1125.60	668.52

Se debe destacar que en el ensayo sobre la viga S_T10A el sensor de desplazamiento que captaba la flecha bajo el punto de carga se ve comprometida su integridad, por ese motivo el registro de la flecha se hace a través del sensor de desplazamiento del actuador hidráulico.

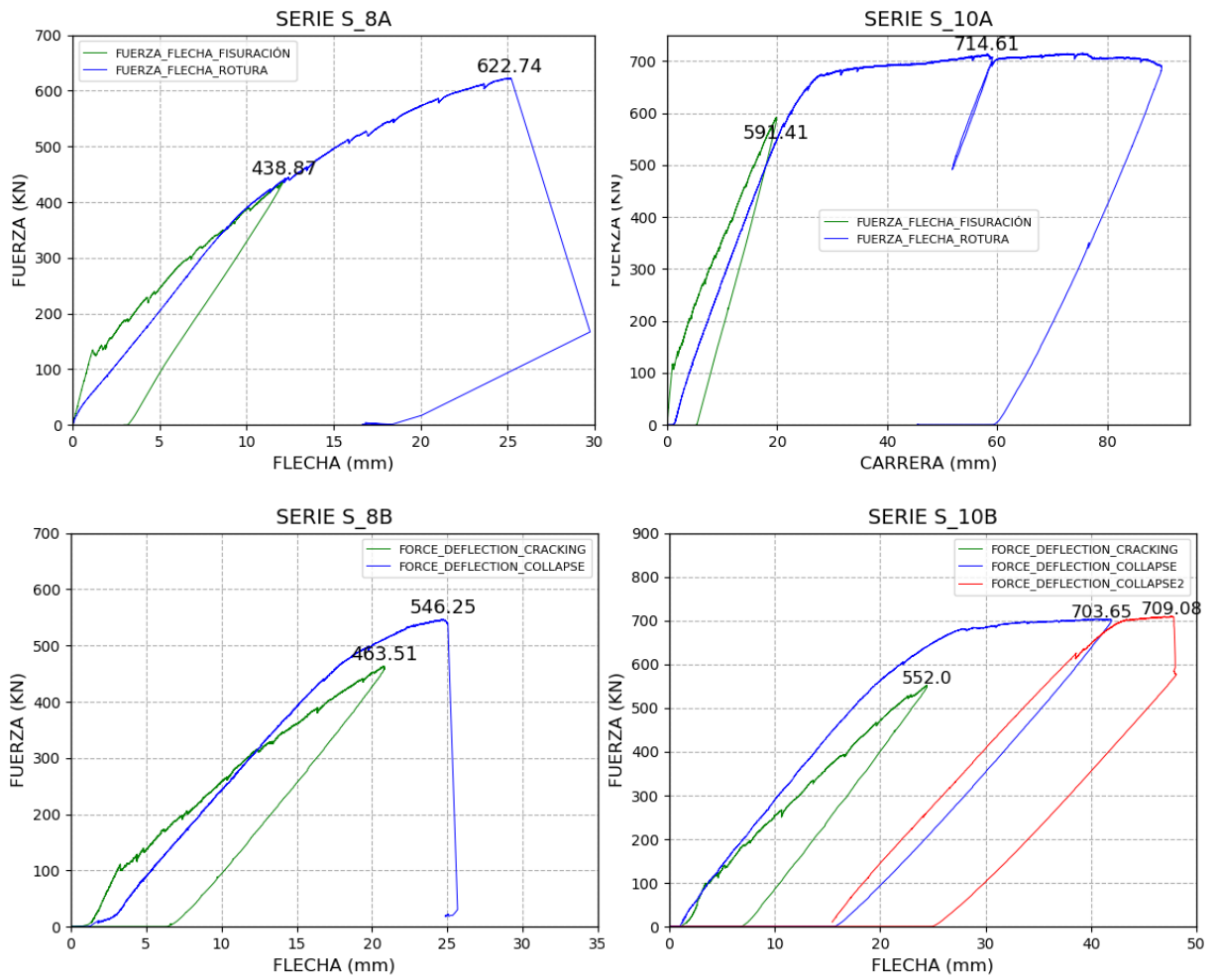


Figura 6. Evolución fuerza flecha de las vigas de las serie S

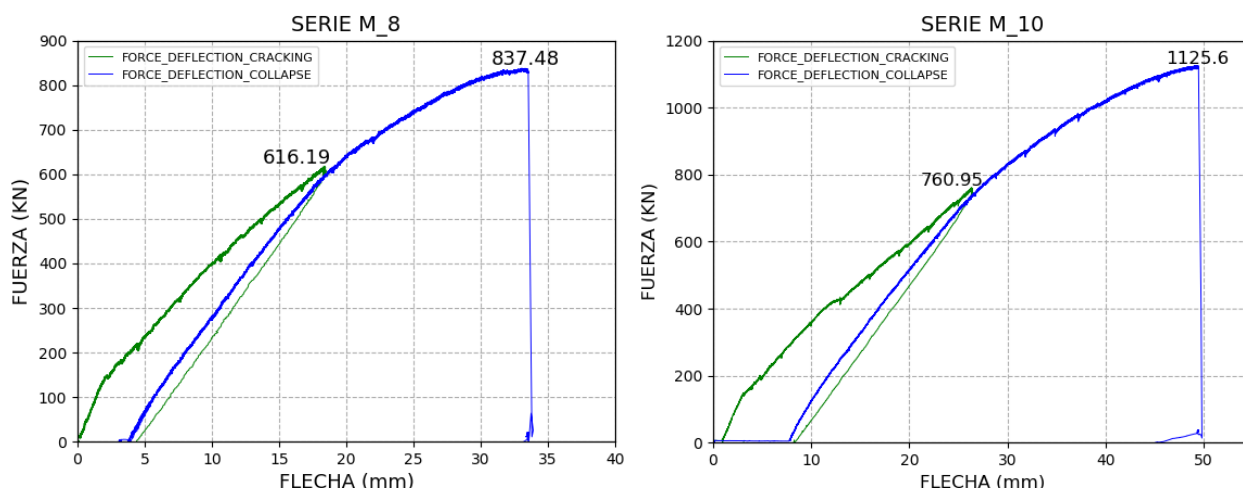


Figura 7. Evolución fuerza-flecha de las vigas de las serie M

Nótese que debido a la caída del

4. Comparación de resultados y cálculos efectuados con normativas vigentes

Se presenta en esta sección un análisis preliminar de los resultados. Para ello en las tablas Tabla 9 y 10 se realiza una comparativa de los cortantes últimos obtenidos en los ensayos de las vigas estudiadas con los calculados mediante la formulación propuesta por diferentes normativas: EHE 08[6], EUROCODE 2 [5] y ACI 318-19[7].

Tabla 8. V_u obtenidos en los ensayos y los calculados por las normativas EHE 08, EC2 2010 y ACI 318-19

Viga	V_u (kN)	V_u según EHE 2008 (kN)	V_u según EC2 2010 (kN)	V_u según ACI 318-19 (kN)
S_T8A	354.7	307.0	133.5	278.2
S_T10A	407.1	367.9	191.9	340.0
S_T8B	328.6	307.1	133.5	278.3
S_T10B	426.5	366.6	191.9	338.2
S_NT	128.4	220.3	209.6	145.3
M_T8	497.4	470.6	195.9	398.6
M_T10	668.5	581.9	307.4	510.1

Tabla 9. Diferencia porcentual entre los V_u de los cálculos propuestos por las normativas y el V_u real

Viga	Diferencia según EHE (%)	Diferencia según EC2 (%)	Diferencia según ACI (%)
S_T8A	15.5	165.7	27.5
S_T10A	10.6	112.1	19.7
S_T8B	7.0	146.1	18.0
S_T10B	16.4	122.2	26.1
S_NT	-41.7	-38.8	-11.7
M_T8	5.7	153.9	24.8
M_T10	14.9	117.5	31.1

5. Conclusiones y futuras líneas

Los datos obtenidos en la campaña experimental y su comparación con los modelos predictivos presentados indican una importante diferencia entre las normativas y la realidad. Queda constancia también la importante dispersión de resultados obtenidos entre los diferentes modelos referente a la capacidad de la resistencia a cortante real, mostrando de esta manera la necesidad crítica de consensuar un modelo predictivo que permita la optimización de la evaluación y diseño de elementos de hormigón armado frente esfuerzos cortantes en todo el mundo.

En la actualidad se sigue trabajando sobre vigas de elevadas dimensiones como las del estudio presentado, con la intención de realizar ensayos sobre vigas de 2 m de canto (serie L). Tal y como se ha comentado en la introducción del documento, la investigación abordará la parametrización del efecto tamaño y su uso en las normativas internacionales.

En posteriores campañas se realizará un análisis experimental sobre las mismas vigas ensayadas con objeto de estudiar la aplicación de refuerzos sobre zonas dañadas con materiales avanzados: polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) y aleaciones con memoria de forma (SMA).

Agradecimientos

Los autores de este documento agradecen a las universidades de A Coruña (UDC), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Illes Balears (UIB) y Universidad Politécnica de Valencia (UPV), sedes de los grupos de investigación que han realizado este estudio y los medios experimentales que han puesto a su disposición. La investigación ha sido posible gracias al proyecto coordinado HORVITAL (Referencias: **BIA2015-64672- C4-4-R**; **BIA2015-64672- C4-3-R**), financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competencia.

Referencias

- [1] D. F. Wiśniewski, J. R. Casas, and M. Ghosn, “Codes for safety assessment of existing bridges-current state and further development,” *Struct. Eng. Int. J. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 552–561, 2012.
- [2] Z. P. Bažant, “Size effect on structural strength: a review,” *Arch. Appl. Mech. (Ingenieur Arch.)*, vol. 69, no. 9–10, pp. 703–725, Nov. 1999.

- [3] A. Carpinteri, B. Chiaia, and G. Ferro, “Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder,” *Mater. Struct.*, vol. 28, pp. 311–317, 1995.
- [4] Ruddle, M. E., Rankin, G. I. B., & Long, A. E. (2003). Arching action-flexural and shear strength enhancements in rectangular and Tee beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 156(1), 63–74.
- [5] CEN, Eurocode2. Design of Concrete Structures. Part 1-1:General rules and rules for buildings. En1992-1-1. Brussels, 2004
- [6] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [7] ACI 318-19, American Concrete Institute Building Code Requirements for Structural Concrete.