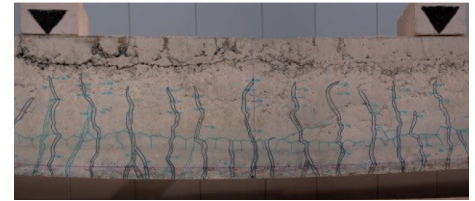


Estudio experimental de vigas multicapa de hormigón ligero y hormigón convencional



Experimental study of lightweight and conventional concrete multilayer beams

Fernando-Israel Olmedo-Zazo¹, Juozas Valivonis² y Alfonso Cobo¹, Nuria Llauradó-Pérez¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid. Calle Ramiro de Meztu, 7 – 28040 Madrid (España)

² Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures. Sauletekio al. 11 – 10221 Vilnius (Lituania)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8496> | Recibido: 15/06/2017 • Evaluado: 19/07/2017 • Aceptado: 21/09/2017

ABSTRACT

Lightweight concrete (LWC) has advantages over conventional concrete (CC). For the same strength value, LWC has a lower weight so the load over the structure is reduced. However, CC produces shorter deflections for the same load. The combined use of both materials could optimize the best behavior of each. The goal of this paper is to study experimentally the multilayer LWC and CC beam behaviour. It is compared against monolithic LWC and CC beams.

• **Keywords:** Lightweight concrete, multilayer beam.

RESUMEN

El hormigón ligero (HL) tiene ventajas frente al hormigón convencional (HC). Para los mismos valores de resistencia, tiene un menor peso, lo que redunda en menores cargas. En cambio, el HC sufre menores deformaciones para un mismo nivel de carga. El uso combinado de ambos materiales podría optimizar las mejores prestaciones de cada material.

El objeto del presente trabajo de investigación es la estudiar experimentalmente el comportamiento de vigas multicapa de HL y HC, comparado frente a vigas monolíticas de ambos materiales.

Palabras clave: Hormigón ligero, vigas multicapa.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de Hormigón ligero (HL) tiene evidentes ventajas respecto al uso de empleo Hormigón convencional (HC) [1]. Para alcanzar la misma resistencia a la compresión que el HC, el HL requiere de una dosificación más rica en cemento. Esto hace que las ventajas del HL no sean competitivas para hormigones convencionales con resistencias en el entorno de 25 – 35 MPa. El

empleo conjunto de ambos materiales puede suponer una ventaja competitiva, optimizando las ventajas del HL con un menor coste.

En el presente trabajo se ha estudiado el comportamiento conjunto de vigas mixtas de HL y HC, y se han comparado con vigas patrón monolíticas de cada uno de los hormigones empleados.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Se han producido vigas de una sección de 15 x 30 cm y una longitud de 3,00m. Se han realizados 4 tipologías: viga tipo A, formada por una sección monolítica de HC; viga tipo B, formada por un núcleo de 10 cm de HL y capas exteriores de 10 cm de HC; viga tipo C, formada por un núcleo de 20 cm de HL y capas exteriores de 5 cm de HC; viga tipo D, formada por una sección monolítica de HL. Todas las vigas contaban con el mismo armado, formado por 2Ø14, en la cara inferior y 2Ø6 de montaje en la cara superior. La cuantía mecánica teórica es del 13,69%. Se colocaron cercos Ø6 en los laterales de la viga, dejando el tercio central sin armadura transversal. De cada tipología se realizaron 3 vigas. En la Figura 1 se muestra un esquema de las secciones empleadas.

El hormigón empleado, tanto para HC como para HL se ha dosificado para una resistencia de 25 MPa. Se hicieron ensayos de caracterización (compresión en probeta cilíndrica Ø150x300 mm, compresión en probeta cúbica 100x100x100 mm, y flexotracción en probeta prismática 100x100x400 mm) de ambos tipos de hormigón. La dosificación concreta de cada tipología de hormigón se indica en la Tabla I. El acero empleado disponía de un límite elástico garantizado de 500 MPa. Las vigas se hormigonaron de forma sucesiva, con un tiempo de espera entre el vertido de las diferentes tongadas de aproximadamente 1 h.

Las vigas se ensayaron a flexión, simplemente apoyadas, con dos cargas iguales aplicadas a tercios. La luz entre apoyos fue de 2,50 m. Se monitorizaron con sensores para estudiar la deformación. Las

vigas se ensayaron aplicando la carga con control de desplazamiento (0,02 mm/s). Las vigas se ensayaron en tres periodos de tiempo (28, 45 y 60 días) para estudiar si existía algún tipo de evolución en el comportamiento de las vigas con la edad.

3. RESULTADOS

Los ensayos de caracterización arrojaron los siguientes resultados,

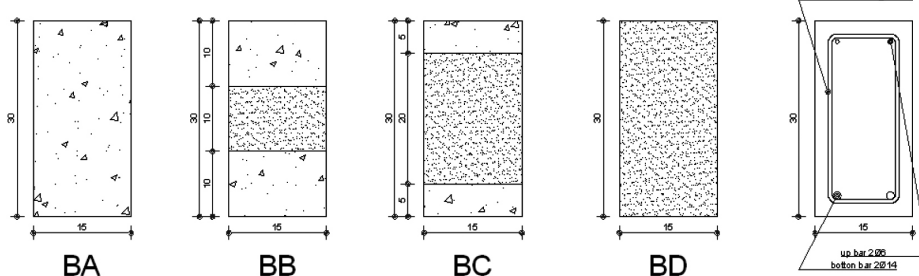


Fig. 1: Sección transversal y armado de las vigas ensayadas

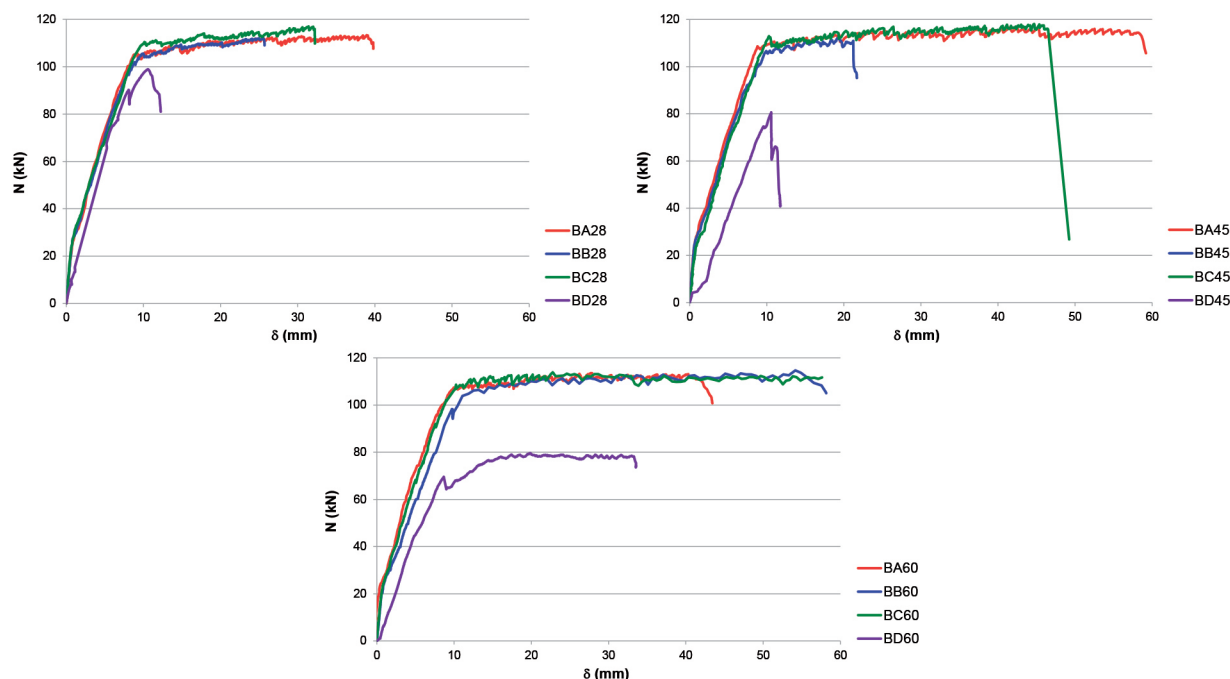


Fig. 2: Diagrama carga desplazamiento de las 12 vigas

indicados en la Tabla II. Para cada probeta ensayada se muestra la tensión de rotura (s), el módulo de elasticidad (E), la deformación de rotura (ϵ_{Rot}) y la densidad (ρ).

El HL presentó una segregación mayor que la habitual en este tipo de hormigones, por lo que presentaba valores más bajos de los esperados. La gran diferencia de densidades entre los diferentes componentes del hormigón ligero hace que los áridos ligeros, de menor densidad que la pasta, floten en ella, dando lugar a la citada segregación. Si bien este hecho es común en general en el

LWC, en la presente serie de probetas, era mucho más marcado que lo habitual.

El patrón de la gráfica de carga desplazamiento de las vigas presenta un comportamiento muy parecido en todas las vigas, salvo en la viga monolítica de HL. La gráfica comienza con un primer tramo hasta la fisuración de las vigas (t_1). A partir de ese punto, y hasta la plastificación del acero (t_2), la gráfica sigue subiendo con una pendiente inferior a la interior. Desde ese momento, la gráfica entra en un tramo dentado sensiblemente horizontal hasta la rotura de la pieza en el momento último MU (t_3). En la Figura 2 se muestran las gráficas de las 12 vigas, agrupadas por edad de ensayo.

En la Tabla 3 se muestran los valores correspondientes a la carga (Load), desplazamiento (d), la energía absorbida durante la deformación de la viga, determinada como el área encerrada bajo la gráfica (Energy), como medida de la ductilidad y la rigidez, considerada como la pendiente de la gráfica carga-desplazamiento (K). Todos esos valores se ofrecen

Material	Tipo	RC (kg/m ³)	LWC (kg/m ³)
c	CEM II/A-LL 42,5N	350	550
s	0/4	920	-
	expanded clay 0/4	-	372
g	4/16	980	-
	expanded clay 4/8	-	444
w	w/c : 0,51	180	-
	w/c : 0,45	-	248
Aditivo 1	Superplastificante BASF Glenium 115 - 0,6%	2,1	-
	Superplastificante BASF Glenium 115 - 0,8%	-	4,4

Tabla I: Resultados obtenidos

Cilindre					Cube				
Piece	σ (Mpa)	E (Mpa)	ϵ_{Rot} (%)	ρ (kg/m ³)	Piece	σ (Mpa)	E (Mpa)	ϵ_{Rot} (%)	ρ (kg/m ³)
NDCB-28-1	47,54	32.869	3,557	2.431,90	NDCS-45-1	60,62	-	-	2.347,30
NDCB-28-2	44,98	32.035	3,548	2.429,30	NDCS-45-2	59,95	-	-	2.378,50
NDCB-28-3	46,21	34.840	2,708	2.434,30	NDCS-45-3	60,06	-	-	2.388,10
LECB-28-2*	-	-	-	1.282,40	LECS-45-1*	17,83	-	-	1.309,30
LECB-28-3*	6,19	7.942	1,224	1.358,20	LECS-45-2*	5,21	-	-	932,5
NFCB-28-1	35,02	21.979	3,409	2.402,10	LECS-45-3*	6,76	-	-	1.198,20
NFCB-28-2	33,63	22.150	3,029	2.352,40	NFCS-45-1	37,90	-	-	2.328,60
NFCB-28-3	34,18	23.138	3,166	2.375,50	NFCS-45-2	38,59	-	-	2.323,80
LECBD-45-1*	8,67	9.184	2,025	-	NFCS-45-3	42,46	-	-	2.325,80
LECBD-45-2*	4,33	6.431	1,665	-	NDCS-60-1	59,95	66.058	1,457	2.356,30
LECBD-60-1*	14,15	21.202	0,742	-	NDCS-60-2	62,91	68.916	0,936	2.367,90
					LECS-60-1*	5,04	6.469	0,765	980,3
					LECS-60-2*	3,16	6.038	3,923	1.006,90
					NFCS-60-1	42,24	44.925	1,572	2.324,30
					NFCS-60-2	43,51	46.422	1,272	2.329,900

* El LWC presentaba una alta segregación, por lo que los resultados son muy dispares, en función de la distribución de la pasta de mortero

Tabla II: Ensayos de caracterización

	M	BA28	BA45	BA60	BB28	BB45	BB60	BC28	BC45	BC60	BD28	BD45	BD60
Load (kN)	t ₁	25,2	27,0	24,1	22,2	26,7	20,3	31,1	26,5	20,6	15,3	9,2	1,5
	t ₂	105,1	108,6	106,9	104,1	106,1	103,9	106,8	112,3	106,9	90,2	74,6	69,3
	t ₃	113,3	113,0	112,4	110,7	110,0	114,7	117,0	116,1	111,8	98,9	80,6	78,5
δ (mm)	t ₁	0,82	0,77	0,48	0,63	0,79	0,64	1,11	1,12	0,64	1,11	2,18	0,44
	t ₂	8,76	8,80	9,86	10,22	9,79	11,09	9,27	10,19	10,13	8,07	9,55	8,65
	t ₃	38,94	58,63	40,78	25,68	20,96	54,16	31,40	46,38	55,77	10,57	10,58	32,98
Energy (Nm)	t ₁	7,03	10,02	8,85	7,37	12,66	5,77	20,11	15,45	7,29	7,92	19,00	0,53
	t ₂	516,20	550,85	638,36	696,52	637,92	645,24	549,05	653,45	657,28	230,58	324,57	312,60
	t ₃	3832,73	6200,51	4061,33	2378,28	1855,92	5411,23	3024,90	4788,80	5722,57	465,45	403,49	2168,41
K (N/mm)	t ₁	30,73	35,06	50,21	35,24	33,80	31,72	28,02	23,66	32,19	13,78	4,22	3,41
	t ₂	10,06	10,16	8,83	8,54	8,82	8,00	9,28	9,46	9,09	10,76	8,87	8,26
	t ₃	0,27	0,09	0,18	0,43	0,35	0,25	0,46	0,11	0,11	3,48	5,83	0,38

Tabla III: Resultados de los ensayos de flexión

para el instante de fisuración (t_1), el instante de plastificación (t_2) y el instante de rotura (t_3).

4. DISCUSION

El comportamiento de las vigas monolíticas de HC (BA) y las vigas mixtas (BB y BC) es muy similar entre sí. Hasta el instante de plastificación (t_2) las gráficas N-d de estas tipologías de vigas es casi coincidente. Hasta el instante de rotura (t_3), las gráficas discurren en paralelo, alcanzando valores muy similares de carga, pero valores muy diferentes de desplazamiento.

Las vigas monolíticas presentan un esquema de fisuración continua desde la cara inferior de las vigas hasta aproximadamente un tercio de la cara superior. En cambio, las vigas mixtas cuentan con dos niveles de fisuración. El primero desde la cara inferior de las vigas hasta aproximadamente un tercio de la cara superior, similar al de las vigas monolíticas. El segundo, específico de las

vigas mixtas, desde la unión de la capa inferior con la intermedia, subiendo aproximadamente 5 cm, para posteriormente unirse en una fisura longitudinal que al une todas. En la Figura 3 se muestra el esquema de fisuración de todas las vigas.

En general, la energía absorbida por las vigas, aumenta con la edad de la viga. En la Figura 4 se muestra la energía absorbida en cada viga ensayada, en cada escalón de la gráfica N-d. La gráfica muestra como la energía absorbida hasta el momento de la plastificación (t_2), es muy similar en todos los casos. Las diferencias existentes se producen entre el momento de plastificación (t_2) y el momento de la rotura (t_3).

Considerando la ductilidad como el cociente entre ambas energías (E_3/E_2), puede afirmarse que la tipología de vigas monolíticas de HC es la más dúctil. En la Tabla 4 se muestras los valores de energía para cada instante (E_2 y E_3), el cociente de ambos (E_3/E_2), el promedio de los cocientes ($ProE_3/E_2$), la desviación típica de la relación a diferentes edades ($Desvest_{3/2}$), la desviación

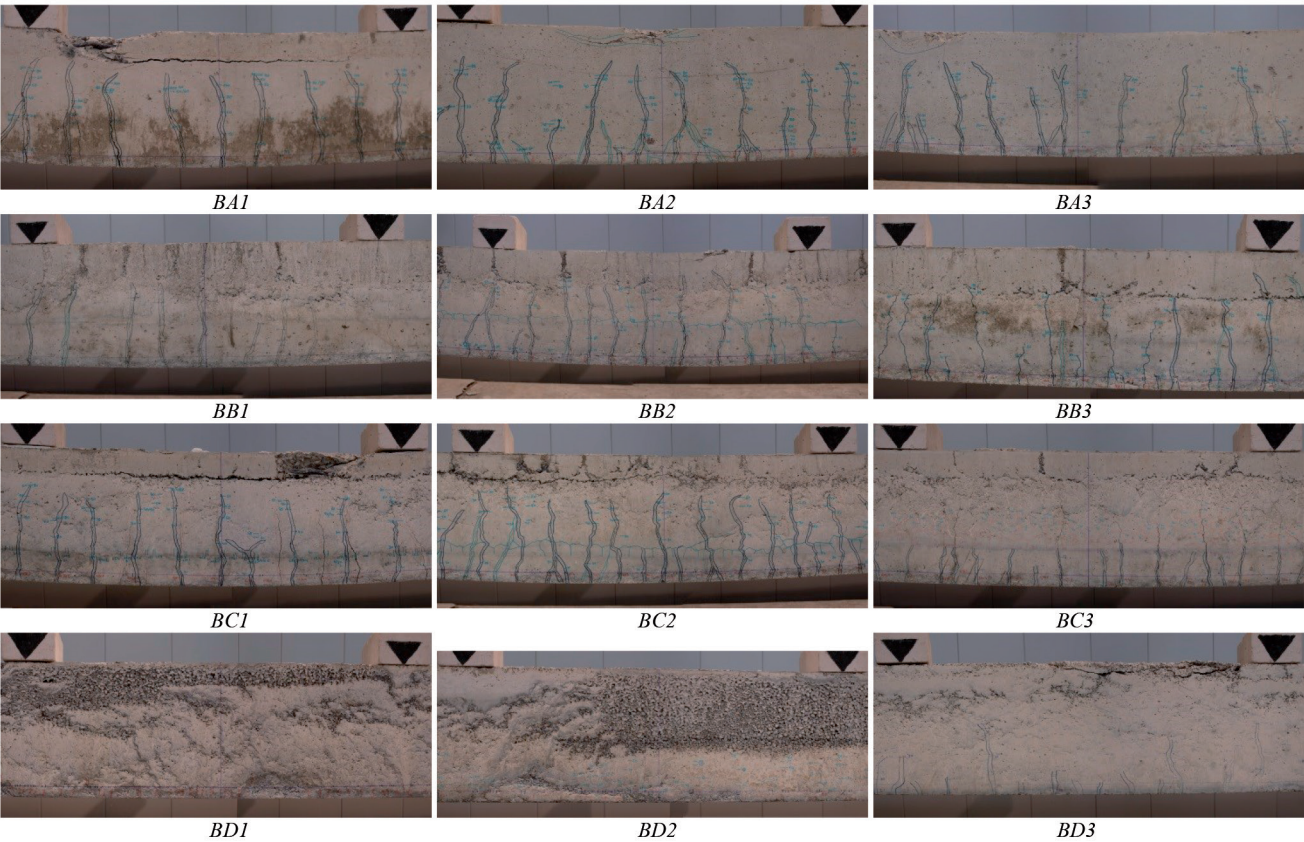


Fig. 3: Diagrama carga desplazamiento de las 12 vigas

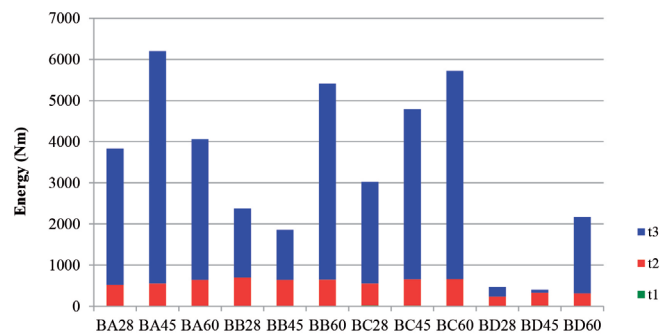


Fig. 4: Diagrama carga desplazamiento de las 12 vigas

rotura que el resto de las vigas. Por tanto, esta configuración es la más dúctil de las estudiadas.

- Las vigas monolíticas (BA y BD) presentan un menor número de fisuras que las vigas mixtas (BB y BC), por existir únicamente un nivel de fisuración.
- La energía absorbida por las vigas hasta la plastificación del acero es muy similar. En cambio, la energía absorbida previa al colapso es muy superior en la viga monolítica de HC (BA) que en el resto de las vigas.
- La rigidez de la viga aumenta con la edad del hormigón. La alta segregación del HL hace que los resultados teóricos difieran de los experimentales. Cuanto mayor es la proporción

	BA28	BA45	BA60	BB28	BB45	BB60	BC28	BC45	BC60	BD28	BD45	BD60
E_2	516,20	550,85	638,36	696,52	637,92	645,24	549,05	653,45	657,28	230,58	324,57	312,60
E_3	3832,73	6200,51	4061,33	2378,28	1855,92	5411,23	3024,90	4788,80	5722,57	465,45	403,49	2168,41
E_3/E_2	7,42	11,26	6,36	3,41	2,91	8,39	5,51	7,33	8,71	2,02	1,24	6,94
$ProE_3/E_2$		8,348			4,903			7,181			3,399	
$Desvest_{3,2}$		2,574			3,027			1,604			3,088	
$Dessta_{3,2}$		0,308			0,617			0,223			0,908	
Bi/BA		1,000			0,587			0,860			0,407	
Δ_{RC}		-			41,26%			13,97%			59,28%	

Tabla IV: Ductilidad

	BA28	BA45	BA60	BB28	BB45	BB60	BC28	BC45	BC60	BD28	BD45	BD60
$Q_U(T_{est})$ kN	113,30	113,00	112,40	110,70	110,00	114,70	117,00	116,10	111,80	98,90	80,60	78,50
$M_U(T_{est})$ kNm	47,21	47,08	46,83	46,13	45,83	47,79	48,75	48,38	46,58	41,21	33,58	32,71
$Q_U(T_{theo})$ kN	107,82	107,70	106,71	106,97	108,97	106,76	109,58	107,46	108,03	74,38	77,88	96,44
$M_U(T_{theo})$ kNm	44,92	44,87	44,46	44,57	45,40	44,48	45,66	44,78	45,01	30,99	32,45	40,18
y_U cm	3,28	3,34	3,22	3,39	3,43	3,20	3,44	3,46	3,19	19,06	18,27	8,75
$z_U(T_{theo})$ cm	25,91	25,88	25,64	25,70	26,18	25,65	26,33	25,82	25,96	17,87	18,71	23,17
Δ %	4,84%	4,69%	5,06%	3,37%	0,94%	6,93%	6,35%	7,44%	3,38%	24,80%	3,37%	-22,85%

Tabla V: Valores experimentales y calculados conforme a CM de MU

obtenidos en los ensayos de caracterización. Los valores de la sección fueron los medidos in situ sobre las vigas. En la Tabla 5 se muestran comparados los valores ensayados (T_{est}), con los valores teóricos (T_{theo}).

Los valores, tanto experimentales como teóricos, son muy similares entre sí, para todas las vigas ensayadas salvo la BD. El bloque de la franja comprimida es muy reducida, y en ninguna de las vigas mixtas, pasa de la capa superior de HC. Por eso, y pese a la escasa resistencia alcanzada por el HL, los valores son prácticamente iguales en todas las vigas. Los resultados experimentales están en todos los casos, por encima de los valores teóricos.

5. CONCLUSIONES

- Para vigas de baja cuantía de acero, apenas tiene influencia en el M_U las características del hormigón de la capa intermedia. El escaso espesor del bloque comprimido, hace que no entre en juego en el cálculo del modelo simplificado.
- En todos los casos, el diagrama Carga desplazamiento (N-d) presenta un esquema muy parecido. En el caso de las vigas monolíticas de HC (BA) y de las vigas mixtas (BB y BC) la gráfica es prácticamente coincidente hasta el momento de la plastificación de la armadura. Las vigas monolíticas de HC presentan una mayor deformación en el momento de la

de HL en la sección, mayor es la discrepancia entre ambos valores.

- La ductilidad de las vigas monolíticas de HC (BA), medida como la energía absorbida antes de la rotura, es de término medio 1,3 veces superior al de las vigas mixtas (BB y BC).
- La formulación propuesta por el EC-2, para el cálculo del $M_{U,pl}$, presenta una muy buena aproximación al valor obtenido en los ensayos cuando el hormigón actuante es HC. Para el HL la afirmación no es concluyente, fruto de la alta segregación, y la alta dispersión en los valores obtenidos en los ensayos de caracterización.

BIBLIOGRAFÍA

[1] ACI (2003). ACI 213R-03 Guide for structural lightweight-aggregate concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
[2] CEN (2010) Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. Brussels

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer las múltiples facilidades ofrecidas por la VGTU, y en especial a todo el personal adscrito al Laboratorio del Departamento de Hormigón Armado y Fábricas.