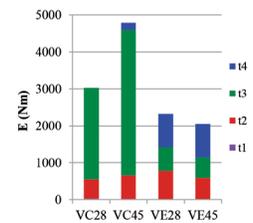


Influencia del proceso constructivo en el comportamiento de las vigas multicapa de hormigón ligero



Influence of the construction processing the multilayer lightweight concrete beam behaviour



Fernando-Israel Olmedo-Zazo¹, Luis Carrillo-Alonso¹, Juozas Valivonis² e Inmaculada Martínez-Pérez³

¹ Universidad Politécnica de Madrid. ETS Edificación. Dpto. de Tecnología. Av. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid (España)

² Universidad Politécnica Vilnius Gediminas. Saul tekio al. 11 - 10221 Vilnius (Lituania).

³ Universidad Politécnica de Madrid. ETS Edificación. Dpto. Construcciones Arquitectónicas. Av. Juan de Herrera, 4 - 28040 Madrid (España) (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9021> | Recibido: 29/10/2018 • Inicio Evaluación: 13/11/2018 • Aceptado: 14/05/2019

ABSTRACT

- When a multilayer concrete beam is built, several concrete mixtures could be poured sequentially. Usually concrete used in external layers are higher resistance than those placed in internal layers. Time between the pouring of the different layers could have influence on the beam behaviour. The goal of this paper is to study how temporary offset on manufacturing the multilayer concrete beams has influence on their mechanical behaviour.
- **Key words:** Lightweight concrete, multilayer concrete beams, pouring speed.

RESUMEN

Al ejecutar una viga multicapa de hormigón, se vierten de forma sucesiva hormigones que pueden tener distintas dosificaciones. Generalmente se utilizan hormigones con mayor capacidad mecánica en las capas extremas, estando el núcleo central reservado a hormigones menos resistentes y ligeros. Además, el tiempo transcurrido entre el vertido de dos capas contiguas podría tener influencia en el comportamiento final de la viga resultante. El presente trabajo ha tenido así por objeto estudiarla influencia del decalaje temporal en el hormigonado de las distintas capas de una viga multicapa sobre su comportamiento mecánico, habiéndose desarrollado ensayos de rotura de distintas vigas que han permitido conocer las diferencias de comportamiento entre todas ellas. Posteriormente se ha procedido a determinar si realmente es el proceso constructivo su causante o son otros factores los que han provocado las diferencias encontradas.

Palabras clave: Hormigón ligero, vigas mixtas de hormigón armado, velocidad de hormigonado.

El empleo de áridos ligeros para reducir el peso del hormigón es conocido desde el Imperio Romano [1]. Se ha utilizado para usos tan diversos como edificios, puentes, plataformas petrolíferas o barcas [2, 3]. Su empleo está tan expandido actualmente que existen multitud de normas que regulan su cálculo y puesta en obra [4- 6].

Debido a su menor peso, las estructuras de hormigón ligero (HL) ofrecen, respecto de las estructuras de hormigón convencional (HC), la posibilidad de, a igualdad de canto, alcanzar mayores luces, y reducir las deformaciones. De igual modo, disminuyen el tamaño de las cimentaciones y en el caso de actuaciones de rehabilitación, reducen las intervenciones. Por añadidura, las estructu-

ras de HL brindan valores más altos de aislamiento térmico y un mejor comportamiento frente al fuego [4].

La diferente naturaleza de los áridos de HL frente a los empleados en el hormigón convencional HC, hacen que la distribución de tensiones en el interior de la matriz del mortero sea diferente en ambos materiales [7]. Estas diferencias han propiciado estudios específicos del comportamiento a flexión atendiendo a diferentes aspectos teóricos como la adherencia [8], el tamaño y la forma de los elementos resistentes [9], el tamaño máximo del árido [10], la ductilidad de la sección [11], o la forma en que se aplica la carga en ciclos [12].

El mayor precio para una misma resistencia característica del HL frente al HC, hace que este tipo de estructuras aún no se hayan generalizado. El empleo combinado de ambos materiales se presenta como una alternativa posible para optimizar ambos materiales.

En diversos estudios, tanto aquellos realizados con vigas monolíticas [13], como aquellos desarrollados con vigas multicapa [14], se indica que para vigas con una misma cuantía de armadura pasiva, el valor del momento último ofrece muy pocas diferencias independientemente de la resistencia de los hormigones que las compongan. Hay que reseñar que, según algunos estudios establecen, el diferente valor de la retracción generada en cada tipo de hormigón utilizado en una misma viga tiene influencia sobre el comportamiento de las vigas [15]. La coacción al movimiento generado por la retracción, causada por la presencia de otras capas adyacentes a través del rozamiento o por la existencia de armaduras de cosido, genera unos estados tensionales de tracción y compresión en las distintas capas, previos a la entrada en carga de las vigas. Para evaluar este efecto hay que tener en cuenta que los valores máximos de retracción se presentan en las primeras edades del hormigón, disminuyendo a lo largo del tiempo, y que, por otro lado, la adherencia entre las distintas capas de hormigón varía en función de la edad del hormigón, creciendo con el tiempo.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el comportamiento a flexión de vigas multicapa fabricadas con HC en las capas externas y HL en el núcleo, ejecutadas con diferentes tiempos de hormigonado, para analizar la influencia que este parámetro tiene en el comportamiento general de las vigas.

1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se elaboraron en total 4 vigas multicapa con una sección transversal de 15 x 30 cm y una longitud de 300 cm, con una capa

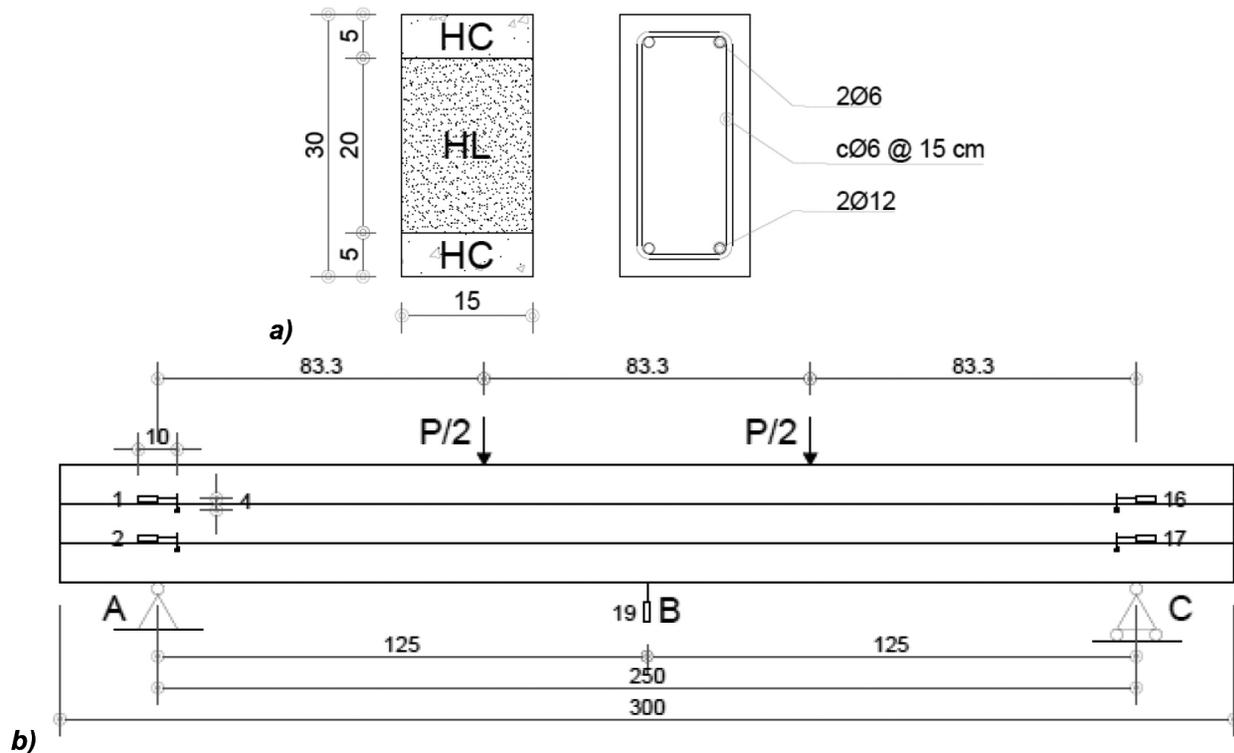


Fig. 1: a) Sección tipo de la viga y su armado y b) distribución de cargas y sensores

central de 20 cm de HL y capas exteriores de 5 cm de HC (Figura 1a). Las cuatro vigas contaban con el mismo armado, formado por 2 barras de diámetro 14 mm en la cara inferior, y 2 barras de diámetro 6 mm de montaje en la cara superior. Resultó así que la cuantía de armadura longitudinal colocada era del 6,84%. Adicionalmente se dispuso en las vigas una armadura de cortante formada por cercos de diámetro 6 mm en los tercios laterales de la viga, dejando el tercio central sin armadura transversal. El acero empleado disponía de un límite elástico garantizado de 500 MPa.

La primera serie de dos vigas (VC) se hormigonaron en continuo. Inmediatamente después de verter una capa de hormigón se mezclaba la siguiente dosificación y se vertía tan pronto estaba lista. Las otras dos vigas (VE), se ejecutaron de forma escalonada, dejando una semana entre el vertido de una capa y la inmediatamente superior.

Todas las vigas se ensayaron a flexión, simplemente apoyadas, con dos cargas iguales aplicadas a tercios de la luz. La luz entre apoyos era de 250 cm. Las cargas aplicadas fueron garantizando una velocidad de desplazamiento uniforme (0,02 mm/s). Tanto la serie de vigas VE como las VC se testaron para 2 edades distintas: una de cada serie a 28 días (VE28 y VC28) y la otra a 45 días (VE45 y VC45) con el objetivo de poder valorar si existía algún tipo de evolución en el comportamiento de las vigas en función de su edad.

Se colocaron extensómetros para monitorizar el desplazamiento de las vigas (Figura 1b), tanto en el centro de cada viga para obtener la flecha (Sensor 19), como en los extremos, en la unión de cada capa, para detectar el posible deslizamiento de las capas (sensores 1, 2, 16 y 17). La medida angular surge como la variación de la longitud del sensor (10 cm), en relación a la altura del apoyo (4 cm). Todas las medidas indicadas son teóricas, no obstante, antes de iniciar los ensayos, se procedió a la medición real de cada una de ellas.

Las amasadas de hormigón empleadas, tanto para HC como para HL, se dosificaron para una resistencia teórica de 25 MPa. La

dosificación del HL y del HC fue la misma para cada tipo de viga. La dosificación del HL contó con 550 kg de cemento por cada m³, el árido empleado fue arcilla expandida, tanto en su fracción fina como gruesa, la relación agua cemento fue de 0,45, y se usó un superplastificante en una proporción del 0,8% del peso de cemento.

La dosificación del HC fue de 350 kg de cemento por cada m³, con una relación agua cemento de 0,5, y se usó un superplastificante en una proporción del 0,6% del peso de cemento. Se hicieron ensayos de caracterización (compresión en probeta cilíndrica Ø150x300 mm), de cada tipo de hormigón. Estas pruebas se realizaron a la misma edad en la que fueron ensayadas las vigas.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

2.1. RESULTADOS

Los valores medios de la caracterización mediante ensayos de compresión en probeta cilíndrica (s [MPa]) arrojaron resultados muy desiguales: El HC, utilizado en la capa inferior de las vigas hormigonadas en continuo (VC), presentaba valores de resistencia próximos a los 35 MPa, mientras que el hormigón colocado en la capa superior de las mismas vigas alcanzaba más de 45 MPa. El HL, de las capas centrales, presentaba una gran segregación, por lo que escasamente superaba los 6 MPa.

Por el contrario, los resultados obtenidos en los ensayos de compresión de los tres hormigones utilizados en las vigas VE presentaban valores de resistencia mucho más uniformes, en concreto, los hormigones de las capas externas obtuvieron valores de resistencia cercanos a los 25 MPa, y el HL de las capas centrales superó escasamente los 20 MPa [16].

Simultáneamente se llevaron a cabo los ensayos de flexión de cada una de las vigas, resultando de estas pruebas los correspondientes gráficos carga (N[kN]) desplazamiento (d [mm]) que se muestran en la Figura 2.

En la Figura 2 se observa un patrón de comportamiento muy similar en las gráficas de las cuatro vigas. Todas comienzan con un primer tramo recto hasta la fisuración de las vigas (t_1) correspondiente a la inercia bruta de las secciones. A partir de ese punto, y hasta la plastificación del acero (t_2), las gráficas siguen creciendo de forma casi lineal, pero con una pendiente inferior a la inicial, en este caso correspondiente a la inercia fisurada. Desde ese punto (t_2), la gráfica entra en un tramo dentado en el que apenas existe incremento de carga, pero si aumenta notablemente el desplazamiento, hasta la rotura de la pieza al alcanzarse el momento último M_U (t_4). A lo largo del tramo entre (t_2) y (t_4), se localiza el punto en el que se llega a la carga máxima (t_3).

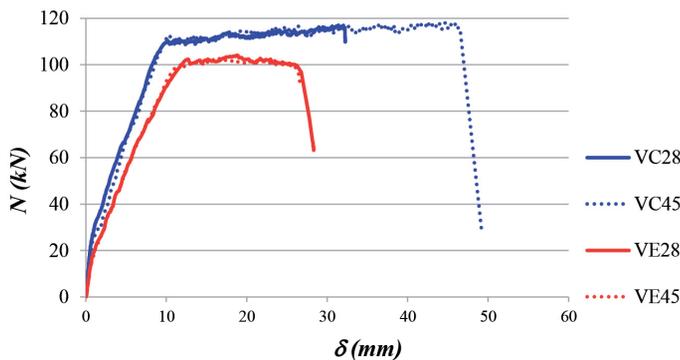


Fig. 2: Diagrama carga-deformación de las vigas mixtas

En la Tabla 1 se muestran los valores correspondientes a la carga (N [kN]), el desplazamiento (d [mm]) y la energía absorbida por la viga durante su desplazamiento (E [Nm]), como medida de la ductilidad de las secciones, tanto en valores absolutos como relativos entre ellos. En concreto en la Tabla 1a se muestran los valores absolutos tanto para el instante de fisuración (t_1), como el de plastificación (t_2), el de carga máxima (t_3) y el de rotura (t_4). En la Tabla 1b se muestran para los mismos parámetros (carga, desplazamientos y energía absorbida) la diferencia existente entre el valor del instante de plastificación (t_2) y el de rotura (t_4), D_{4-2} . A continuación se calcula la ratio entre el valor obtenido en el caso anterior y el valor del instante de plastificación (t_2), $D_{4-2/2}$. Finalmente se comparan los distintos valores obtenidos, tomando como referencia el valor en el instante de rotura (t_4) de la viga VC28 (viga multicapa hormigonada en continuo y ensayada a la edad de 28 días), $t_{4(VC28/V)}$.

2.2. DISCUSIÓN

En las vigas ensayadas, en general, no se aprecia ningún tipo de evolución en los resultados con la edad, tal y como teóricamente sería esperable, dado que los hormigones a 28 días deben haber alcanzado una resistencia muy parecida a la que tendrán a largo plazo.

El comportamiento de ambas tipologías de vigas es muy similar en cuanto a su patrón resistente, pero las correspondientes a las vigas hormigonadas de forma escalonada (VE) presentan unas características mecánicas ligeramente inferiores a las de las

Viga	N (kN)				δ (mm)				E (Nm)			
	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4
VC28	31,1	106,8	117	117	1,11	9,27	31,40	31,40	20,1	549,1	3024,9	3024,9
VC45	26,5	112,3	118,1	116,1	1,12	10,19	44,69	46,38	15,5	653,4	4591,7	4788,8
VE28	18,9	102,4	104	100,1	0,94	12,66	18,88	27,69	7,0	779,8	1414,9	2321,0
VE45	17,8	98,5	102,7	100,3	0,98	11,17	16,66	25,61	8,1	592,4	1145,1	2049,5

Tabla 1a: Valores de carga (N), deformación (δ) y energía absorbida (E), de cada viga y para cada momento observado

Viga	N (kN)				δ (mm)				E (Nm)			
	VC28	VC45	VE28	VE45	VC28	VC45	VE28	VE45	VC28	VC45	VE28	VE45
Δ_{4-2}	10,2	3,8	-2,3	1,8	22,1	36,2	15,0	14,4	2475,8	4135,4	1541,3	1457,1
$\Delta_{4-2/2}$	0,10	0,03	-0,02	0,02	2,39	3,55	1,19	1,29	4,51	6,33	1,98	2,46
$t_{4(VC28/V)}$	-	99,2%	85,6%	85,7%	-	147,7%	88,2%	81,6%	-	158,3%	76,7%	67,8%

Tabla 1b: Valores comparados de carga, deformación y energía absorbida, de cada viga

Load	δ												
	VC			VE			VC			VE			
	Media	Des.tip	CV	Media	Des.tip	CV	Media	Des.tip	CV	Media	Des.tip	CV	
t1	28,8	3,25	11,3%	18,4	0,78	4,2%	t1	1,12	0,01	0,6%	0,96	0,03	2,9%
t2	109,6	3,89	3,6%	100,5	2,76	2,7%	t2	9,73	0,65	6,7%	11,92	1,05	8,8%
t3	117,6	0,78	0,7%	103,4	0,92	0,9%	t3	38,05	9,40	24,7%	17,77	1,57	8,8%
t4	116,55	0,64	0,5%	100,20	0,14	0,1%	t4	38,89	10,59	27,2%	26,65	1,47	5,5%
Δt_1	0,0%	-	0,0%	-36,3%	-	-62,5%	Δt_1	0,0%	-	0,0%	-13,9%	-	364,6%
Δt_2	0,0%	-	0,0%	-8,3%	-	-22,7%	Δt_2	0,0%	-	0,0%	22,5%	-	32,3%
Δt_3	0,0%	-	0,0%	-12,1%	-	34,4%	Δt_3	0,0%	-	0,0%	-53,3%	-	-64,2%
Δt_4	0,0%	-	0,0%	-14,0%	-	-74,2%	Δt_4	0,0%	-	0,0%	-31,5%	-	-79,7%

Tabla 2: Valores comparados de carga y desplazamiento, de cada viga y para cada momento observado

Viga	Resultados Test		Cálculo teórico según EC2				Dif. Test/teórico ($M_{u(Test)} - M_u$)/ M_u
	$Q_{u(Test)}$ kN	$M_{u(Test)}$ kN·m	y cm	x cm	U_c kN	M_u kN·m	
VC28	117,0	48,75	2,48	3,10	163,8	49,05	-0,61%
VC45	116,1	48,38	2,48	3,10	166,4	47,47	1,90%
VE28	100,1	41,71	4,03	5,03	153,0	50,25	-16,99%
VE45	100,3	41,79	4,06	5,08	152,4	49,87	-16,20%

Tabla 3: Valores experimentales y calculados conforme a EC-2

vigas hormigonadas en continuo (VC). Hasta el momento de la fisuración (t_1), todas las gráficas son prácticamente coincidentes, no obstante, debido a las mayores resistencias alcanzadas por el hormigón colocado en la primera tongada de las vigas VC, el momento de fisuración es mayor para estas vigas.

Desde el instante de fisuración y hasta la plastificación, las gráficas adquieren pendientes distintas. La pendiente de las de la tipología VC es mayor, lo que es congruente con la mayor resistencia de los hormigones colocados en sus capas superiores, y por lo tanto con su mayor módulo de deformación y rigidez seccional.

Tomando como referencia las vigas hormigonadas en continuo (VC), el valor de la carga de plastificación es aproximadamente un 80% mayor en las vigas VC que en las vigas VE. Las gráficas desde la plastificación (t_2) son prácticamente planas, aumentando ligeramente el nivel de carga y con una gran deformación, pero con mayores ganancias para las vigas de la tipología VC. En el instante de carga máxima (t_3), el momento soportado es más del 12% superior en las vigas VC. Finalmente, en el instante de la rotura (t_4), la carga es prácticamente igual que en el caso anterior, pero la deformación de las vigas VC es más de un 30% superior que en las vigas VE, hormigonadas de forma escalonada. En la Tabla 2 se muestran los valores comparados de la carga y el desplazamiento de las vigas ensayadas (Tabla 2).

Existe a su vez una clara diferencia entre el comportamiento reflejado por la viga VC28 y el de la viga VC45. En base a los resultados obtenidos en otros estudios realizados por los autores [17], es el resultado de la viga VC28 el que se desviaría de los resultados medios de este tipo de vigas, siendo el comportamiento de la VC45 el más cercano al comportamiento habitual o esperable. El hecho de la rotura temprana de la viga VC28 es consecuencia de las débiles resistencias de los hormigones ligeros colocados en las capas intermedias de estas vigas, resistencias que presentan además una gran dispersión de resultados. La conjunción de ambas características explica la rotura diferencial entre las dos vigas VC.

En la Figura 3 se muestra la energía absorbida en cada viga ensayada, en cada escalón de la gráfica N-d. La gráfica muestra que la energía absorbida hasta el momento de la plastificación (t_2) es muy similar en todos los casos. Las vigas VE muestran valores algo superiores por presentar mayor deformación. A partir de ese momento el incremento de la energía absorbida por las vigas VC es significativamente superior al de la otra tipología de vigas.

En la Tabla 1b, como se ha indicado anteriormente, se muestran los valores comparados entre las distintas vigas. En relación a la energía absorbida, a este respecto hay que hacer notar la enorme diferencia entre la ratio D_{4-2}/t_2 de las vigas VC, ampliamente por encima de 4 en todos los casos, y las vigas VE, en cuyo caso no llegan a superar un valor de 2,5. En términos absolutos, la diferencia entre la viga tomada como referencia VC28 y cualquiera de las vigas hormigonadas de forma escalonada, es claramente superior al 20%.

Por otra parte, en la Tabla 3 se muestran comparados los valores del momento último (M_u) obtenido de los ensayos ($M_{u(Test)}$), con los valores teóricos ($M_{u(Theo)}$) obtenidos del cálculo conforme al método simplificado indicado en el EC-2 [5]. Como puede observarse, el valor obtenido del ensayo de las vigas VC presentan una buena aproximación al valor calculado conforme al método propuesto por el EC-2. En cambio, las vigas VE ofrecen unos valores experimentales por debajo del valor teórico de cálculo.

Los resultados de las vigas VC, mejores en el caso de la viga VC45, permiten deducir que al no alcanzarse profundidades de la fibra neutra mayores del espesor de la capa superior, las bajas resistencias de los hormigones HL no han llegado a afectar a la capacidad última de las vigas. En el caso de las vigas VE sí se alcanzan profundidades de fibra neutra mayores, las cuales sí que movilizarían las bajas resistencias de la capa intermedia, no alcanzándose así los valores teóricos esperados.

El patrón de fisuración de ambas tipologías de vigas es muy similar. En la Figura 4 se muestra la fisuración alcanzada en cada viga una vez concluido el ensayo. La separación entre fisuras en el tercio central se reparte de forma muy homogénea. La altura alcanzada por las fisuras se asemeja en todos los casos, acercándose a la fibra de contacto entre la capa intermedia y la superior de hormigón.

En cambio, la forma de rotura de ambas vigas presenta una clara diferencia, puesto que en las vigas hormigonadas en continuo (VC), la rotura se produce acompañada de una separación de la capa superior de hormigón, mientras que en las vigas hormigonadas de forma escalonada (VE) la rotura se produce por agotamiento del hormigón de la capa superior.

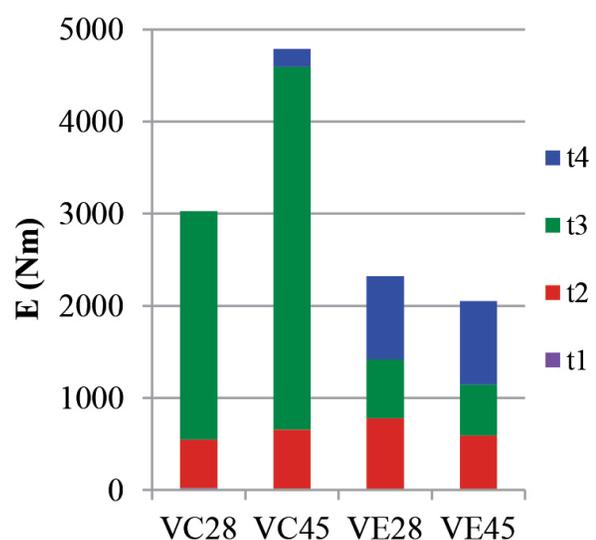


Fig. 3: Diagrama de barras de la energía absorbida

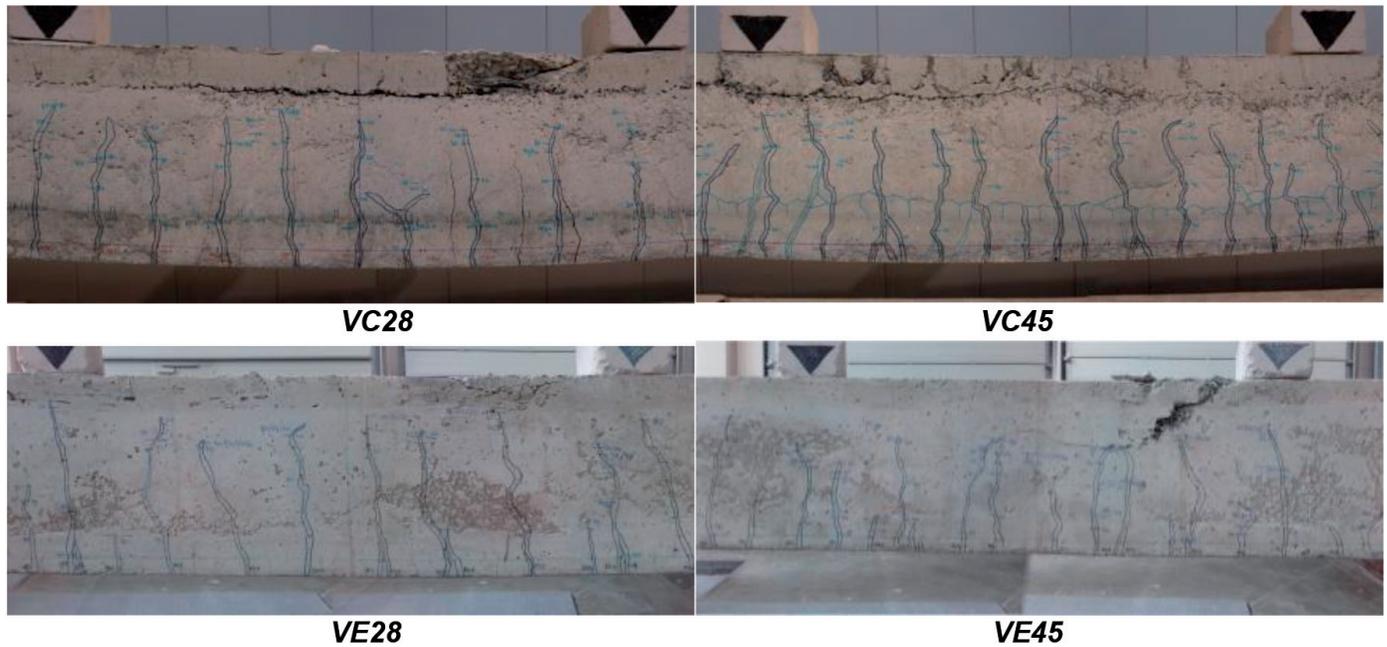


Fig. 4: Patrón de fisuración de las vigas en rotura

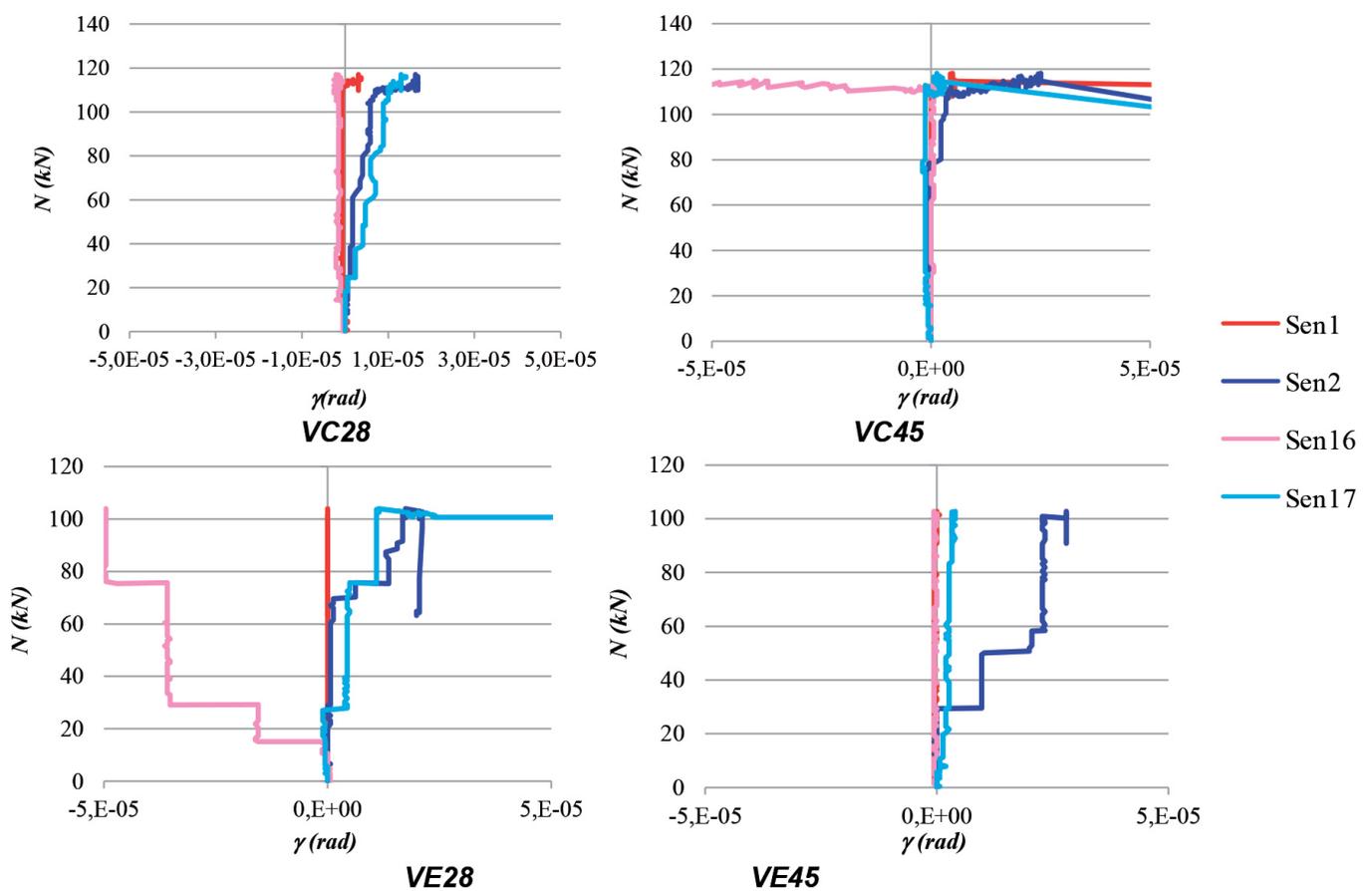


Fig. 5: Gráfico N/γ (deslizamiento entre capas)

Los desplazamientos relativos de una capa respecto de la inmediatamente contigua son menores en las vigas VC que los observados en las vigas VE. En la Figura 5 se muestran las gráficas de carga (N [kN]), ángulo (γ [rad]), utilizando éste último para cuantificar el desplazamiento relativo entre capas. Como puede apreciarse de estos gráficos, el desplazamiento de las capas en las vigas VE, es varios órdenes de magnitud superior al de las vigas VC. Igualmente se puede observar la diferencia entre los resultados de

la viga VC28 y VC45, donde se deduce la rotura frágil y prematura de la primera, no alcanzándose en ella el grado de plastificación de la segunda.

3. CONCLUSIONES

- En todos los casos, el diagrama carga-desplazamiento ($N-d$) presenta un esquema muy parecido. Tanto en las vigas mul-

ticapa hormigonadas de forma continua (VC), como en las vigas multicapa hormigonadas de forma escalonada (VE), la gráfica es prácticamente coincidente hasta el momento de la plastificación de la armadura.

- Las vigas VC presentan una mayor deformación en el momento de la rotura que las vigas VE. Es más, la deformación desde la plastificación (t_2) hasta la rotura (t_4) es mayor en el caso de las vigas de hormigonado continuo (VC), indicando así que esta configuración es la más dúctil de las estudiadas.
- 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 hormigonadas en continuo (VC) que las de las vigas de hormigonado escalonado (VE).
- La ductilidad de las vigas de hormigonado continuo (VC), medida como la energía absorbida antes de la rotura, es de término medio, 1,25 veces superior al de las vigas de hormigonado escalonado (VE).
- La formulación propuesta por el EC-2, para el cálculo del M_{pl} , presenta una buena aproximación al valor obtenido en los ensayos para las vigas VC. En cambio, para el caso de las vigas VE, los resultados ofrecen resultados inseguros. Este último efecto vendría ocasionado por las bajas resistencias de los hormigones ligeros de las capas intermedias, dado que en el caso de las vigas VE sí se necesitaría su contribución resistente en el instante de la rotura. En el caso de las vigas VC, las altas resistencias alcanzadas en los hormigones de la capa superior, no hicieron necesaria la contribución en rotura de los hormigones de la capa intermedia, resultando en este caso los valores ajustados a los que se prevén según EC2. En definitiva, habría que señalar que es la mayor o menor resistencia de los hormigones dispuestos en cada una de las capas lo que llevaría a validar el uso de la formulación del EC2 en estos casos.
- La forma de rotura de las vigas de hormigonado continuo (VC) va acompañada de la separación de las capas superiores, mientras que el fallo de las vigas de hormigonado escalonado (VE) es debido al aplastamiento del hormigón de la capa superior. Esta diferencia viene marcada por las distintas resistencias de los hormigones colocados en cada una de ellas. Así, en el caso de las vigas VC compuestas de unos hormigones en capas extremas muy resistentes y un núcleo muy débil, el colapso se produce al fallar el contacto entre capas antes de que se llegue a agotar completamente el hormigón de la capa superior, dada la bajísima resistencia del HL de la capa central. En el caso de las vigas VE, como las resistencias de todos sus hormigones es más homogénea, la rotura se puede alcanzar al agotar el hormigón de la capa superior.

En definitiva, de los resultados de los ensayos se deduce que aquellas vigas mixtas en las que su proceso constructivo se ha desarrollado mediante un hormigonado en una sola operación (VC) presentan mayores prestaciones mecánicas que aquellas otras vigas en que su proceso constructivo contempló una parada en el proceso de vertido de hormigón (VE). Los autores consideran en cambio que las diferencias encontradas se deben más a las diferentes características resistentes de los hormigones que al propio proceso constructivo seguido, el cual aparentemente no debería inducir grandes diferencias en el comportamiento de todas ellas.

Los autores quieren agradecer el apoyo y las múltiples facilidades ofrecidas por todo el personal adscrito al Laboratorio del

Departamento de Hormigón Armado y Fábricas de la Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas (VGTU) donde se llevaron a cabo los ensayos expuestos en esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] TW Bremner, TA Holm, VF Stepanova. (1994). "Lightweight concrete. A proven material for two millenia". Proceedings of Advances in Cement and Concrete. University of New Hampshire, Durham SC.
- [2] Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI). (1971), "Lightweight Concrete—History, Application, Economics," Salt Lake City, Utah
- [3] Hoff, G. C., (1992). "High Strength Lightweight-Aggregate Concrete for Arctic Applications," Structural Lightweight Aggregate Concrete Performance, SP-136, T. A. Holm and A. M. Vaysburd, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- [4] ACI (2003). ACI 213R-03 Guide for structural lightweight-aggregate concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [5] CEN (2010) Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. Brussels
- [6] Ministerio de Fomento (2008). Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08.1ª Edición. Madrid.
- [7] F. Leonhardt (1986). "Estructuras de Hormigón Armado". Tomo II "Casos especiales del dimensionamiento de estructuras de hormigón armado". Librería El Ateneo editorial. Buenos Aires.
- [8] M.I. Kaffetzakis, C.G. Papanicolaou (2016) "Bond behavior of reinforcement in Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete". Construction and Building Materials 113. Pag. 641-652
- [9] S. Jae-II, Y. Keun-Hyeok, K. Heung-Yeoul, C. Byong-Jeong (2013) "Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete". Construction and Building Materials 38. Pag. 854-864.
- [10] M. Karamloo, M. Mazloom, G. Payganeh, (2016) "Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete". Construction and Building Materials 123. Pag. 508-515
- [11] A. Charif, M. Jamal Shannag, S. Dghaither (2014) "Ductility of reinforced lightweight concrete beams and columns". Latin American Journal of Solids and Structures 11. Pag. 1251-1274
- [12] A. Caratelli, A. Meda, Z. Rinaldi (2016) "Monotonic and cyclic behaviour of lightweight concrete beams with and without steel fiber reinforcement". Construction and Building Materials 122. Pag. 23-35
- [13] F.I. Olmedo, F. Carrasco, P de la Rosa, J. García (2017) "Estudio experimental comparativo del comportamiento a flexión de un hormigón ligero estructural frente a un hormigón convencional en función de la cuantía de acero". Dyna, Ingeniería e industria 2. Pag. 235-240
- [14] F.I. Olmedo, J. Valivonis, A. Cobo (2017) "Experimental study of multilayer beams of light concrete and normal concrete". Procedia Engineering 172 (2017) 808 – 815
- [15] L. Juknevičius, G. Marciukaitis and J. Valivonis (2006). "Influence of technological factors on the state of stress and strain in three-layer reinforced concrete structures". Journal of Civil Engineering and management, 12:3, 195-204.
- [16] F.I. Olmedo (2018). "Caracterización mecánica experimental de un hormigón ligero estructural" Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid
- [17] F.I. Olmedo, J. Valivonis, A. Cobo, N. Llauro (2018) "Estudio experimental de vigas multicapa de hormigón ligero y hormigón convencional" Dyna 93. Pag 182/185. DOI: <https://doi.org/10.6036/8496>