



Received: 15-05-2016
Accepted: 29-05-2016

Diferencias de comportamiento entre un hormigón convencional y un hormigón ligero Behaviour differences between a Normal Concrete and a Lightweight Concrete

F.I. Olmedo^a, I. Mateos^b, F.B. Díaz^b, M. N. González^a, A. Cobo^a

^a Universidad Politécnica de Madrid (Spain), ^b Lafarge (Spain,)

Resumen—Resulta paradójico que a pesar de las enormes ventajas que supone en muchas aplicaciones de construcción el empleo del hormigón ligero estructural (HLE) frente a un hormigón convencional (HC), su uso todavía no se haya generalizado. Muy posiblemente, el desconocimiento de su comportamiento físico y mecánico contribuye de forma decisiva a la utilización de un HC en muchas ocasiones en las que su sustitución por HLE sería totalmente competitivo y ventajoso.

Este trabajo pretende ampliar el conocimiento del comportamiento del HLE para contribuir a su utilización en todas las situaciones en donde su empleo supone una clara ventaja frente al HC.

Palabras clave— Hormigón ligero estructural; comportamiento mecánico, características resistentes.

Abstract—It is a paradox that despite of the huge advantages of the Lightweight Concrete (LWC) over the Normal Concrete (NC) in a number of construction applications, its use has not been widespread. Quite sure, the lack of knowledge about LWC mechanical behavior leads to the use of NC in many occasion when a the use of LWC will be totally competitive and beneficial.

This paper aims to expand the knowledge about LWC behavior to contribute to its use at any situation when its use is an obvious advantage against NC.

Index Terms— Structural Lightweight aggregate concrete; mechanical behavior, strength characteristic.

F.I. Olmedo, estudiante de doctorado en la Escuela de Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, Avda/ Juan de Herrera 6, Madrid, 28040, España (e-mail: fiolmedoz@aparejadoresmadrid.org)

I. Mateos, Responsable de Productos Especiales de Lafarge España, C/ Arroyo de la Vega 4 y 6, Alcobendas (Madrid), 28108, España (e-mail: isabel.mateos@lafarge.com)

F.J. Díaz, Responsable de Ensayos físicos y Metrología de Lafarge España, C/ Arroyo de la Vega 4 y 6, Alcobendas (Madrid), 28108, España (e-mail: javier.diaz@lafarge.com)

M.N. González, Profesora Titular Universitaria Escuela Universitaria de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, Avda/ Juan de Herrera 6, Madrid, 28040, España (e-mail: mariadelasnieves.gonzales@upm.es)

A. Cobo, Catedrático de Escuela Universitaria de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, Avda/ Juan de Herrera 6, Madrid, 28040, España (e-mail: alfonso.cobo@upm.es)

I. INTRODUCCIÓN

Las primeras construcciones conocidas con hormigones ligeros (HL) datan de más de 2.000 años. Existen diversas construcciones realizadas por esa época en la región del Mediterráneo, siendo las tres más importantes el puerto de Cosa, el Panteón de Roma y el Coliseo, todas ellas levantadas durante el Imperio Romano (*Bremer, Holm y Stepanova, 1994*) (*Morgan, 1960*). Desde este momento se conocen obras realizadas con HL en aplicaciones donde principalmente interesase disminuir el peso propio de la estructura. Durante la Primera Guerra Mundial se emplearon HL con pizarras y

arcillas expandidas en la construcción de cascos de buques. Posteriormente, el Hotel Park Plaza de St. Louis, el edificio del Southwestern Bell Telephon en Kansas City y el tablero del puente colgante de San Francisco, son ejemplos típicos del empleo de HL en los años 20-30 del siglo XX. Sin embargo, para encontrar un empleo generalizado del HL hay que desplazarse en el tiempo hasta la segunda mitad del siglo XX, momento en el que aparecen los áridos ligeros industriales con mayor uniformidad en sus propiedades.

El componente que más influencia tiene en la densidad de un hormigón es el árido, debido al gran porcentaje con que entra en su composición. Por este motivo, para la obtención de hormigones con bajas densidades es preciso recurrir a áridos de baja densidad. Básicamente existen tres formas de conseguir hormigones ligeros: mediante el empleo de áridos de baja densidad; mediante la eliminación de los finos; e incorporando por medios físicos o químicos burbujas de gas en su masa. Los tres tipos de hormigones se suelen denominar respectivamente hormigón de áridos ligeros, hormigón sin finos y hormigón celular. Este trabajo se ocupa únicamente del hormigón de áridos ligeros.

II. NORMATIVA

ACI 213R-03 (ACI, 2003) define el HLE como aquel que posee una densidad comprendida entre 1.120 y 1.920 kg/m³ y una resistencia a compresión medida en probeta cilíndrica a los 28 días de al menos 17 MPa.

La Instrucción EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008) se ocupa de estos hormigones en su Anejo 16 "Recomendaciones para la utilización de hormigón ligero", donde se establecen los valores 1.200 y 2.000 kg/m³ como los límites de densidad para estos hormigones. Así mismo se indica la necesidad de que estos hormigones contengan áridos ligeros para poder ser contemplados por la Instrucción y se excluyen expresamente los hormigones celulares. Como resistencias mínimas y máximas para hormigones armados se indican los valores de 25 MPa y 50 MPa, respectivamente.

El Eurocódigo 2 (AENOR, 2010) [5] trata este tema en su capítulo 11 "Estructuras de hormigón con árido ligero", fija únicamente un valor máximo de densidad para estos hormigones (2.200 kg/m³) y obliga a que los áridos ligeros empleados posean una densidad de partículas inferior a 2.000 kg/m³. Se establece una horquilla de resistencias a compresión entre 12 y 80 MPa.

III. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES DE COMPRESIÓN EN EL INTERIOR DEL HORMIGÓN LIGERO

La distribución o el flujo de tensiones en el interior de un hormigón ligero difiere enormemente del flujo en un hormigón convencional. En los hormigones ligeros el mortero

es más rígido que el árido grueso, en el hormigón convencional sucede lo contrario. Debido a esto, en un HC, las tensiones de compresión se transmiten preferentemente siguiendo el camino de la grava, mientras que en el HL las tensiones viajan por el mortero que rodea la grava. En la figura 1 (Leonhardt, 1986) se muestra la trayectoria de las tensiones principales de compresión determinadas fotoelásticamente por Wischers y Lusche (Wischers y Lusche, 1972). La curvatura de las trayectorias de compresión implica tracciones horizontales en el mortero situado por encima y por debajo de la grava, mientras que en el HL estas tensiones horizontales de tracción se producen en la superficie lateral de la grava, lo que origina planos de fractura que en muchos casos producen la rotura de la grava en un plano vertical.

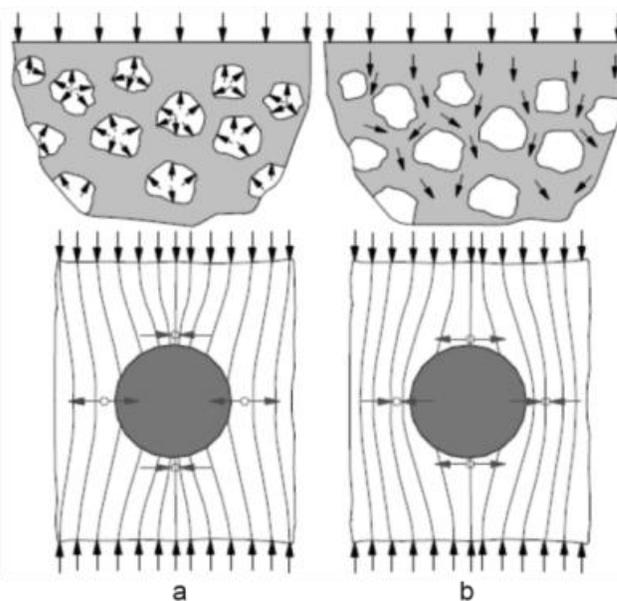


Fig. 1: Trayectoria de las tensiones principales en un HC (a) y HL (b)

Según lo anterior, la resistencia a compresión de un HL depende de la resistencia del mortero y de la forma de la grava, su separación y su forma de repartirse en la masa. Como orden de magnitud, la resistencia del mortero debe ser un 40 o 50% superior a la resistencia prevista en el hormigón.

IV. MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL

El módulo de elasticidad de un hormigón depende de los módulos de elasticidad de sus constituyentes y de su proporción en la mezcla. El hormigón se puede considerar como un material bifásico constituido por el árido grueso y el mortero.

El módulo de elasticidad de un HL es menor al de un HC debido a la menor rigidez del árido grueso. La deformación bajo carga máxima de un HL es superior a la de un HC.

En la figura 2 se muestra lo anterior, mediante la comparación de los diagramas tensión deformación de un HL (densidad igual a 1.300 kg/m^3) y un HC (densidad igual a 2.150 kg/m^3) sometidos a compresión hasta rotura (Leonhardt, 1986). El eje de ordenadas se ha normalizado para facilitar la

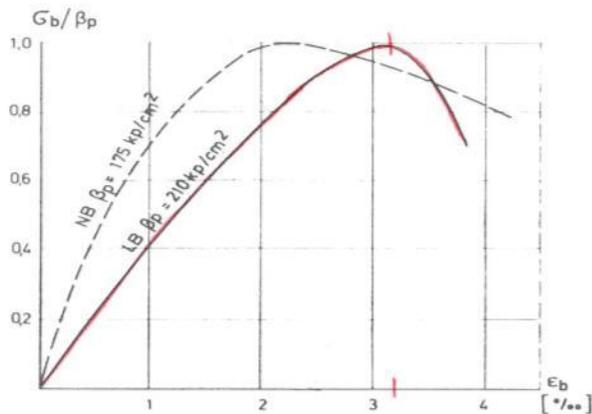


Fig. 2: Diagramas tensión deformación de un HL y de un HC

comparación.

La expresión indicada por ACI 318 $E_c = \rho^{1.5} \cdot 0,043f_c^{1/2}$ puede ser empleada para HL con densidades comprendidas entre 1.440 y 2.480 kg/m^3 y resistencias entre 21 y 35 MPa (ACI, 2003).

La diferencia entre las deformaciones por flexión en las estructuras de HL y de HC no es proporcional a la razón entre los módulos de deformación de ambos materiales. En un HL las deformaciones son solo un poco mayores debido a que en un HL el momento de inercia de la sección fisurada es mayor al de un HC. Además, la zona comprimida de la sección es mayor en un HL, por lo que la deformación máxima en la zona comprimida y la curvatura son menores. A este efecto hay que sumarle el que las cargas debido al peso propio son inferiores, lo cual provoca menores deformaciones.

El menor valor del módulo de elasticidad de un HL tiene efectos beneficiosos frente a los esfuerzos debidos a las

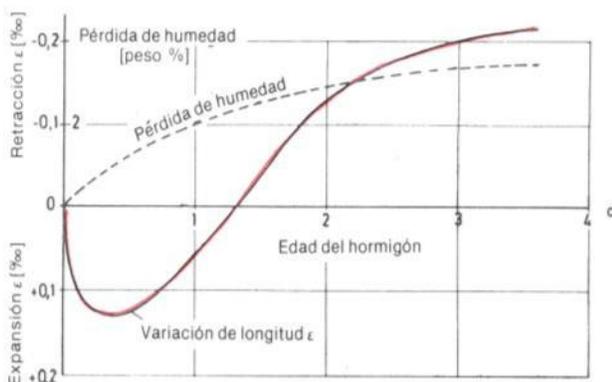


Fig. 3: Evolución de la deformación por retracción en un HL

deformaciones impuestas que resultan menores a los que se producen en un HC.

En la tabla I se muestran los valores del momento de inercia de la sección fisurada para tres módulos de elasticidad del hormigón. Los cálculos se han realizado para una sección de

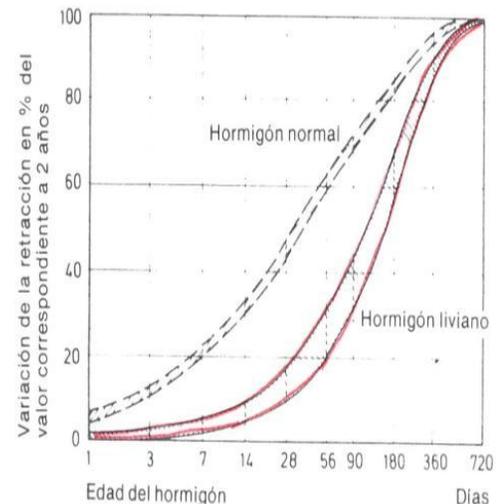


Fig. 4: Evolución de la retracción en HL y en HC

canto de 30 cm de base y 50 cm de altura con recubrimientos mecánicos de 4 cm y armada con 5 barras de diámetro 16 mm en tracción y sin armadura en compresión.

V. RESISTENCIA A TRACCIÓN

La resistencia a tracción de los HL es superior a la de los HC para hormigones de hasta 25 MPa de resistencia. Para hormigones de resistencias superiores a 35 MPa , la resistencia a tracción de un HL es menor a la de un HC y está condicionada por la resistencia del árido grueso.

VI. RESISTENCIA A LA ADHERENCIA

Ensayos de arrancamiento efectuados sobre armaduras de diámetros 12 mm y 26 mm han dado como resultado que la fuerza necesaria para producir deslizamientos de $0,01 \text{ mm}$ o de $0,1 \text{ mm}$ es más del doble en el HL que en el HC. El aumento para barras de diámetro 12 mm es superior al de 26 mm porque para diámetros reducidos toda la fuerza de adherencia se localiza en la masa de mortero, mientras que para diámetros mayores se moviliza mayor cantidad de material y entra a trabajar la grava. Como en los HL el mortero es más resistente que en los HC, la resistencia a arrancamiento es superior. Cuando se moviliza también la resistencia del árido grueso, que en HL es menos resistente, la resistencia a arrancamiento disminuye.

VII. RETRACCIÓN Y FLUENCIA

El agua contenida en los poros del árido grueso de un HL supone un efecto muy beneficioso porque origina un curado húmedo del mortero que lo rodea. En la figura 3 (Leonhardt, 1986) se muestra el comportamiento frente a retracción durante aproximadamente algo más de tres años de un HL

sellado para impedir la evaporación del agua a la atmósfera. En el eje de abscisas se indica la edad en años y en el eje de ordenadas las deformaciones por retracción. Puede comprobarse como después de la exposición a la atmósfera (20°C y 60% HR) durante los primeros 100 a 300 días se produce una expansión en el hormigón de 10×10^{-5} . Los valores finales de retracción alcanzan los 25×10^{-5} , por debajo de los valores $35-40 \times 10^{-5}$ que se alcanzan en un HC.

En la figura 4 (Leonhardt, 1986) se muestra la comparación de la evolución de la retracción en un HL y en un HC durante dos años. En el eje de abscisas se marcan las edades en escala logarítmica mientras que en el eje de abscisas se indica la variación de la retracción en tanto por ciento respecto del total experimentado en los dos años. Puede comprobarse como en las primeras edades del hormigón, que es el momento en el que el hormigón es más propenso a experimentar fisuraciones por retracción, la deformación por retracción en el HL es muy inferior a la de un HC. Esto se debe al efecto beneficioso de la devolución a la masa de mortero del agua absorbida por el árido grueso poroso. En los primeros siete días las deformaciones por retracción en un HC son superiores en más de un 400% a las de un HL. A la edad de 28 días las deformaciones en un HL son aproximadamente la mitad de las de un HC. A partir de este momento la evolución en ambos hormigones tiende a igualarse.

La forma de las curvas de la deformación por fluencia del HL es prácticamente la misma que la del HC. En la figura 5 (Leonhardt, 1986) se muestra la deformación por fluencia para HL con dos tipos de áridos ligeros.

VIII. COMPORTAMIENTO TÉRMICO

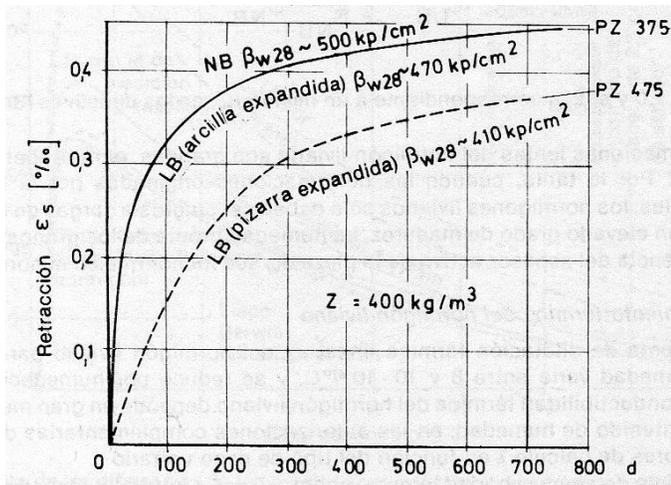


Fig. 5: Deformaciones por fluencia para dos tipos de hormigones ligeros

El coeficiente de dilatación lineal térmica del HL (αT) para contenidos de humedad reducidos varía entre 8 y $10 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y se reduce cuando el hormigón se humedece hasta valores de $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

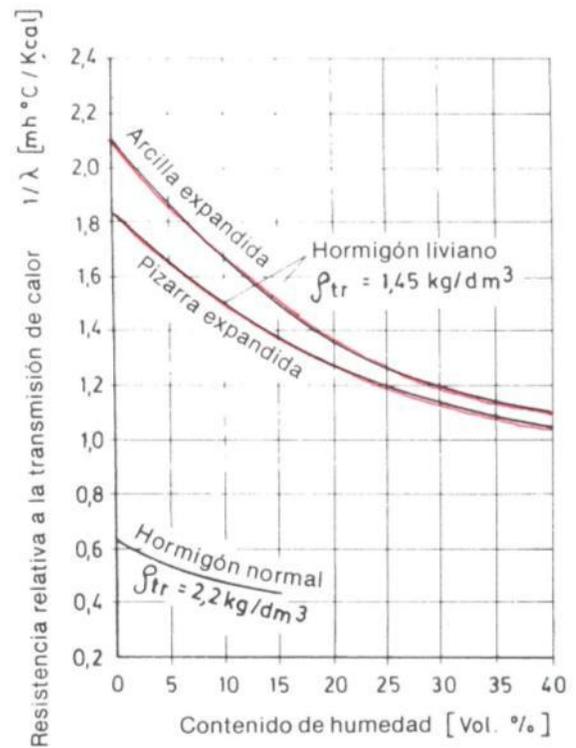


Fig. 6: Comparación entre la conductividad térmica de HL y HC para distintos grados de humedad

El coeficiente de conductividad térmica del HL (λ) depende en gran medida de la densidad y del contenido de humedad del hormigón. Para densidades de 1.400 kg/m^3 y humedades del 5%, pueden encontrarse como valores típicos $\lambda = 0,5 - 0,6 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$. Estos valores son inferiores a la tercera parte del coeficiente de conductividad térmica de los HC y actúan de forma muy favorable en caso de incendio.

TABLA I
MOMENTOS DE INERCIA DE LA SECCIÓN FISURADA EN FUNCIÓN DE E_c .

E_c (MPa)	27000	20000	17000
I_f (m4)	0.0010	0.0013	0.0015

En la figura 6 (Leonhardt, 1986) se muestra la comparación entre el comportamiento frente a la conductividad térmica de dos HL fabricados con distintos tipos de árido y un HC, para distintos grados de humedad en el hormigón. En el eje de abscisas se ha marcado el contenido en humedad del hormigón hasta el 40% y en el eje de ordenadas se ha indicado el valor de la inversa de la conductividad térmica, la resistencia a la transmisión de calor. Puede comprobarse como para niveles de humedad muy pequeños el HL ofrece mucha más resistencia al paso de calor y que a medida que aumenta el nivel de humedad, aumenta la conductividad en todos los hormigones analizados, siendo ese incremento superior en los HL que en los HC. Sin embargo, la conductividad del HL es muy inferior a la de un HC para cualquier grado de humedad.

IX. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

La mayor cantidad de cemento de un HL frente a un HC supone una mayor protección frente a la corrosión de las armaduras. Sin embargo, en ocasiones los áridos ligeros son permeables al paso de los gases y el CO₂ de la atmósfera puede atravesarlos dando lugar a problemas de carbonatación del hormigón. En estos casos será necesario incrementar el recubrimiento de las barras. Es usual que las normas indiquen sobre espesores en el recubrimiento para prevenir este problema. Cuando los áridos ligeros no sean permeables al paso de los gases, la protección de un HL frente a la corrosión de armaduras es superior a la de un HC y su durabilidad también.

X. APLICACIONES COMPETITIVAS DEL HORMIGÓN LIGERO

El HL compite con ventaja frente a un HC en todas aquellas aplicaciones donde interese que la estructura tenga un menor peso y/o un mayor aislamiento térmico. Algunos campos típicos de aplicación son los siguientes:

- En todas las estructuras prefabricadas donde un menor peso supone un menor coste en la fabricación, manipulación, transporte y montaje.
- En las estructuras postensadas donde la armadura activa se emplea con frecuencia para resistir el peso propio de la estructura.
- En los recrecidos de hormigón, donde la estructura base inferior debe resistir el peso de la losa de hormigón vertida in situ.
- En refuerzos de forjados con recrecidos superiores, donde el empleo de HL supone en ocasiones la eliminación del apuntalamiento inferior.
- En estructuras en general, por la reducción de las cargas sobre vigas, pilares y cimientos.
- En estructuras sometidas acciones sísmicas, donde la carga debida al sismo depende de la masa de la estructura.
- En estructuras con grandes requerimientos de protección frente a fuego, por la reducción del espesor que puede conseguirse en los elementos estructurales.
- En muros resistentes de fachada, por la mejora en el aislamiento térmico.

XI. CONCLUSIONES

Los HLE se tratan en las normas ACI, EHE y EC, con distintos criterios de definición en cuanto a densidades y de resistencias mínimas y máximas contempladas.

En un HC las tensiones de compresión se transmiten preferentemente siguiendo el camino de la grava, mientras que

en el HL las tensiones viajan por el mortero que rodea la grava.

La resistencia a compresión de un HL depende de la resistencia del mortero y de la forma de la grava, su separación y su forma de repartirse en la masa.

El módulo de elasticidad de un HL es menor al de un HC debido a la menor rigidez del árido grueso.

La diferencia entre las deformaciones por flexión en las estructuras de HL y de HC es muy pequeña y no son proporcionales a la razón entre los módulos de deformación de ambos materiales.

La resistencia a tracción de los HL es superior a la de los HC para hormigones de hasta 25 MPa de resistencia.

En los HL el mortero es más resistente que en los HC, por lo que la resistencia a arrancamiento de la armadura es superior.

La retracción de un HL es inferior a la de un HC.

El coeficiente de conductividad térmica de un HL es muy inferior al de un HC.

El HL compite con ventaja frente a un HC en todas aquellas aplicaciones donde interese que la estructura tenga un menor peso y/o un mayor aislamiento térmico

REFERENCES

- Bremner TW, Holm TA, Stepanova VF. (1994). "Lightweight concrete. A proven material for two millenia". Proceedings of Advances in Cement and Concrete. University of New Hampshire, Durham SC.
- Morgan MH (1960). Vitruvius, the ten books on architecture translation. Dover Publications, New York.
- ACI (2003). ACI 213R-03 Guide for structural lightweight-aggregate concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- Ministerio de Fomento (2008). Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08.1ª Edición. Madrid.
- AENOR (2010). Eurocódigo 2: Proyectos de Estructuras de hormigón. Asociación española de Normalización y Certificación. Madrid
- Leonhardt F. (1986). "Estructuras de Hormigón Armado". Tomo II "Casos especiales del dimensionamiento de estructuras de hormigón armado". Librería El Ateneo editorial. Buenos Aires.
- Wischers G, Lusche M. (1972). "Einfluß der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal und Leichtbeton. Beton 22, H8, 343-347; H9, 397-403.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.