

ENSAYOS A CORTANTE DE VIGAS DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL AUTOCOMPACTABLE

BEAM SHEAR TEST OF STRUCTURAL SELF-COMPACTING CONCRETE

CLAUDIA JENNY DE LA CRUZ

Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, cjcruz@unalmed.edu.co

JOSÉ TURMO

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Castilla-La Mancha, España

RAVINDRA GETTU

Dept. of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, India, gettu@iitm.ac.in

BRYAN BARRAGÁN

Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica Cataluña, España, bryan.barragan@upc.es

GONZALO RAMOS

Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica Cataluña, España, gonzalo.ramos@upc.es

Recibido para revisar junio 20 de 2008, aceptado marzo 19 de 2009, versión final mayo 14 de 2009

RESUMEN: En el presente trabajo se presenta una serie de ensayos realizados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (Departamento de Ingeniería de la Construcción) de la Universidad Politécnica de Cataluña. La campaña de ensayos incluía una serie de vigas de sección “doble T” de hormigón autocompactable de resistencia media (HAC-RM) y una serie paralela realizada con hormigón convencional (HC) de la misma resistencia mecánica. Se verificó el comportamiento estructural frente al esfuerzo cortante de vigas de hormigón armado y pretensado con armadura pretesa y postesa, y tanto estructuras continuas como isostáticas. Los resultados muestran una menor resistencia a cortante en las vigas con HAC y armadura pasiva y activa. Para las vigas pretensadas con HAC y HC los valores de resistencia a cortante fueron similares.

PALABRAS CLAVE: hormigón autocompactable de resistencia media, hormigón convencional, armado, isostática, engranamiento, pretensado, resistencia a cortante.

ABSTRACT: This paper presents a series of tests performed in the Structural Technology Laboratory of the Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (Department of Construction Engineering) from the Polytechnic University of Catalonia. The campaign included a series of tests of beams section "Double T" Self Compacting Concrete of low strength (HAC-RM) and a parallel series using conventional concrete (HC) of the same mechanical strength. Was observed compared to the structural behavior of shear beams with reinforced concrete and prestressed reinforcement pretesa and postesa, and both continuous isostatic structures. The results show a lower resistance to shear at SCC beams with frame steel active and passive. For beams with prestressed SCC and HC, the shear strength values were similar.

KEYWORDS: Low Strength Self-compacting concrete, Conventional concrete, reinforced, isostatic, aggregate interlocking, prestressed, shear strength.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en La evaluación de la influencia del material en la resistencia a cortante, realizando ensayos con hormigón autocompactable de resistencia media (HAC-RM) [1] y con hormigón convencional (HC) [2].

El proyecto de investigación global se planteó a raíz de los cambios que se han venido introduciendo en los últimos años en la evaluación del Estado Límite Último de Agotamiento frente a Cortante, tanto en la normativa española como en la Europea [3]. Existían dudas razonables en cuanto a la consideración de diversos parámetros en las formulaciones que proporcionan el cortante último de una pieza, así como su extensión a otros hormigones no convencionales [4]. El hormigón autocompactable de altas prestaciones (HAC) es un material cuyo uso se está extendiendo rápidamente por sus evidentes ventajas de trabajabilidad y mejora de la calidad en zonas difícilmente vibrables o fuertemente armadas [5]. Pero muchas de sus aplicaciones se ven restringidas, por lo altos costos en la fabricación de dicho material [6]. De ahí la necesidad de evaluar la pertinencia de un HAC-RM, cuya composición básica es la misma que la de un HC [1]. Basando los trabajos realizados hasta el momento, en las características en estado fresco del material, y por ende de la dosificación y trabajabilidad [7-8].

Sin embargo hay un campo aún no totalmente explotado, que es la influencia en términos de resistencia estructural, del uso de los hormigones autocompactables.

La autocompactabilidad se alcanza mediante aditivos y, a su vez, incrementando considerablemente la proporción de finos en el hormigón ya sea a través de cemento, *Filler* o humo de sílice [9]. También se disminuye normalmente el tamaño máximo de árido y su volumen. Por ello, a priori, parece que puede haber diferencias en comportamiento, respecto a un HC, en todos los aspectos en que el engranamiento de los áridos influya. Así, por ejemplo, puede preverse una menor contribución a la resistencia del cortante del rozamiento entre labios de fisura o también una

posible menor adherencia con las barras corrugadas [10].

También influirá en el cortante la fricción que se desarrolla en juntas entre hormigones. Por el contrario, la resistencia a flexión viene marcada por la resistencia a compresión del hormigón por lo que, normalmente, no debería variar si las resistencias de los hormigones son comparables sean éstos convencionales o autocompactables (HAC) [11-17].

Por ello, esta investigación, se ha centrado en el comportamiento frente a esfuerzos cortantes.

2. PROGRAMA DE ENSAYOS

Los costes y, sobre todo el esfuerzo, que requiere una campaña experimental exigen aprovecharla al máximo. Así pues, se hará una detallada comparación entre el HC y el HAC. La cuantía de armadura longitudinal aumenta la resistencia al cortante al igual que la cuantía de pretensado [4-18]. En este artículo no se evalúa la influencia de las distintas cuantías de acero al cortante.

Altos niveles de pretensado, proporcionan resistencias a cortante mayores [12] y retrasan la aparición de las primeras fisuras por Flexotracción [4]. Por lo que muy seguramente se notará un incremento de la resistencia al cortante a medida que se aumente el nivel del pretensado.

En la Figura 1. , se presenta la preparación de los encofrados y armadura para la fabricación de las vigas con ambos hormigones. Nótese que todas las vigas estaban instrumentadas, para tener un control de deformación desde la aparición de la primera fisura.



Figura 1. Moldes y armadura de las vigas de HC y HAC-RM

Figure 1. Molds and Steel frame for Beams with HC and HAC-RM.

El programa de ensayos consta de un total de 12 vigas isostáticas de igual sección transversal (Ver Figura 2.), sometidas al mismo tipo de ensayo (Ver Figura 3.). Seis (6) de ellas de 3 m de longitud (2,5 m de longitud entre los apoyos, $a/d=2,1$) y otras seis (6) de 7 m de longitud (6,5 m de longitud entre apoyos, $a/d=5,4$).

De cada grupo de seis (6) vigas dos (2) son armadas con armadura convencional, otras dos (2) están armadas con armadura de pretensado pero sin tesar y las dos (2) restantes están armadas con armadura pretesa.

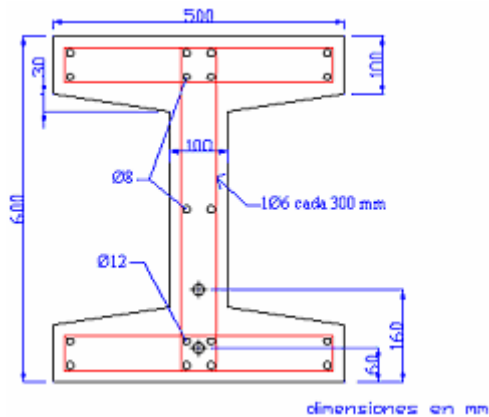


Figura 2. Sección transversal de las vigas de HC y HAC

Figure 2. Transverse section for Beams with HC and HAC

Se quieren examinar las diferencias de comportamiento mecánico, entre HC y HAC-RM (Ver Figura 3).



Figura 3. Montaje del ensayo con HC y HAC-RM
Figure 3. Assembly of test with HC and HAC-RM

Además, se ensayaron seis (6) vigas de sección doble continuas, de dos (2) vanos, con 7 m de longitud total y vanos de 3,25 + 3,25 y una carga puntual a 1,5 m del apoyo central, nuevamente en HC y en HAC-RM (Ver Figura 4).



Figura 4. Montaje de las vigas continuas
Figure 4. Assembly for continuous Beams

3. MATERIAL

Uno de los objetivos adicionales de esta campaña era la dosificación de un HAC-RM con una resistencia del orden de 25 - 30 MPa. La razón es doble. Se ha optado por la utilización de un único hormigón base, cuya dosificación básica es cemento 397 kg/m³, agua 238 kg/m³, arena 0-2 588 kg/m³, arena 2-5 408 Kg/m³, grava 5-12 683 Kg/m³ [1]. De este modo, ambos sólo difieren en su característica de la autocompactabilidad en estado fresco.

Los HAC son alcanzados a partir del uso de materiales convencionales sin la incorporación de finos adicionales. Así el material puede ser provisto por cualquier planta de hormigón preparado aunque no disponga de silos de *Filler* (situación más general). Como contrapartida, el volumen de pasta necesaria para alcanzar la autocompactabilidad hace que se tenga que recurrir a altos contenidos de cemento y una alta relación a/c , lo que va en detrimento de la economía [13].

Para conseguir la característica de la autocompactabilidad se han utilizado un aditivo superplastificante (Glenium C303SCC 0.4%) y un aditivo cohesionante (RHEOMAC 890F 0.5%), con una dosificación de 1.59 kg/m³ y 1.99 kg/m³ respectivamente. Cabe notar las dosis elevadas de cohesionante necesaria para evitar la segregación en un material con tan elevada relación a/c. Estas dosis pueden tener implicaciones en la adherencia.

Esta dosificación está ajustada con el objetivo de obtener unos hormigones con una resistencia característica, f_{ck} , del orden de 25-30 MPa. Es por eso, que el tamaño máximo del árido es sólo de 12 mm, y la relación agua-cemento, $a/c = 0.6$, que es evidentemente algo alta.

La autocompactabilidad, es decir, la habilidad del material de fluir, de pasar entre las barras de armadura sin bloquearse y de resistir la segregación, fue evaluada a través de los ensayos de Escurrimiento, Embudo en V y Caja en L; ensayos habitualmente utilizados para caracterizar estas propiedades intrínsecas del HAC [7].

Tabla 1. Medidas de autocompactabilidad
Table 1. Measures of self compactibility

Ensayo	Parámetro	Resultado
Escurrimiento	T_{50} (s)	1
	D_f (mm)	580
Embudo-V	T_V (s)	2
Caja en L	T_{60} (s)	1
	C_{bL}	0,80

En la Figura 5, se puede observar el aspecto del HAC en el ensayo de Escurrimiento [1]. Donde queda expuesta la fluidez del material (la línea blanca de trazo discontinuo indica los 600 mm) y su gran estabilidad o resistencia a la segregación, evidenciada por la no separación de los componentes en el perímetro de la "torta" final del ensayo y la distribución uniforme del árido grueso.



Figura 5. Ensayo de Escurrimiento [1]
Figure 5. Slump flow test [1]

4. RESULTADOS

Los patrones de deformación son los mismos tanto para el HC, como para el HAC [14]. Todas las vigas presentaron una rotura a cortante, tal como estaba previsto, con plastificación y, en algunos casos, rotura física de los cercos.

Se han observado dos (2) tipos de grietas diagonales en los ensayos realizados en vigas de concreto pretensado: grietas por cortante y flexión, y grietas por cortante en el alma [15]. La fisuración que mostraron fue la esperada, *fisuración diagonal*, con una concentración de abertura de fisura en una fisura principal que es la que llevaba a rotura. Posteriormente las vigas entraban en una fase de post-pico en el que el mecanismo era tipo arco [16]. Sin embargo, en fases avanzadas de carga y, prácticamente ya en el post-pico, sí que ha aparecido una diferencia entre el comportamiento de los dos hormigones.

En el caso de las vigas fabricadas con HAC apareció una fisura horizontal desde la primera fisura de cortante hasta el apoyo, situada en la mitad del canto, produciéndose la rotura física de la viga en esa zona.

Esta fisura horizontal puede deberse a dos factores o, más probablemente, a una combinación de ambos: Por un lado, la aparición justo en la zona por la que discurre un armadura longitudinal, de diámetro 8 mm,

puede ser debida a un fallo en la adherencia de la barra agravado por el escaso recubrimiento necesario en elementos pequeños como éste. Por otro lado, el desplazamiento entre las dos mitades en que quedó dividida la viga sugiere un fallo a rasante.

En las figuras 6 y 7, se puede observar la forma de rotura de las vigas con hormigón convencional y con hormigón autocompactante.

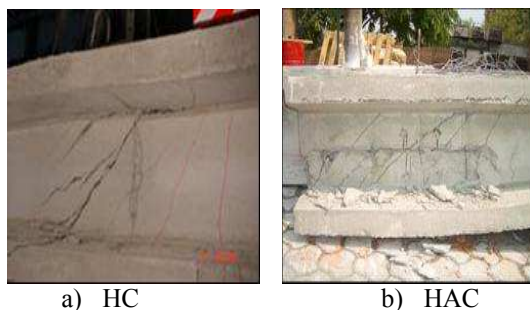


Figura 6. – Formas de rotura de las vigas
Figure 6. – Form of crack for Beams



Figura 7. – Ensayo en vigas continuas
Figure 7. – Test Continuous Beams

En la Figura 7, se puede observar el montaje y Ensayo, para las vigas continuas, en HC y en HAC.

Las curvas carga deformación pueden consultarse en la Figura 8. Como se puede apreciar el comportamiento no es función del tipo de hormigón.

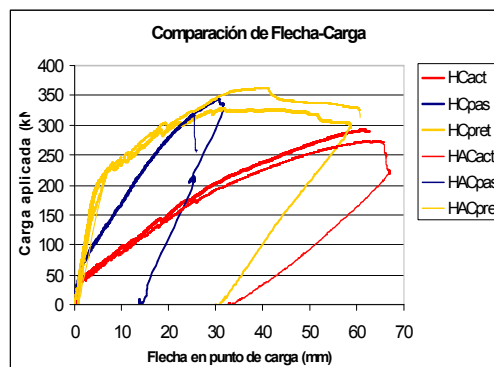


Figura 8. – Curvas carga – flecha para las vigas de HC y HAC, L=6.50 m (pas = armadura pasiva, act = armadura activa no tesada, pret = armadura pretesa)
Figure 8. Curves Strength-strain for Beams with HC and HAC, L=6.50 m (pas = Steel frame passive, act = Steel frame active no prestressed, pret = Steel frame prestressed)

En la tabla 2, 3 y 4 se pueden consultar los resultados de los ensayos en forma de cortante último respuesta para las distintas series.

Tabla 2. Comparación de resultados de las vigas isostáticas L=2.50 m

Table 2. Comparison of various results of isostatic Beams L=2.50 m

Viga con	Resistencia a Compresión (MPa)		Carga última (KN)	
	HAC	HC	HAC	HC
Armadura Pasiva	26,5	31,7	367,5	435,8
Armadura Activa	26,5	31,7	385,5	400,8
Pretesa	29,0	30,3	411,7	421,7

Tabla 3. Comparación de resultados de las vigas isostáticas L=6.50 m

Table 3. Comparison of various results of isostatic Beams L=6.50 m

Viga con	Resistencia a Compresión (MPa)		Carga última (KN)	
	HAC	HC	HAC	HC
Armadura Pasiva	32,0	31,2	316,4	343,4
Armadura Activa	32,4	27,4	272,6	291,5
Pretesa	28,0	32,4	362,0	328,8

Tabla 4. Comparación de resultados de las vigas continuas L=6.50 m

Table 4. Comparison of various results of continuous Beams L=6.50 m

Viga con	Resistencia a Compresión (MPa)		Carga última (KN)	
	HAC	HC	HAC	HC
Armadura Pasiva	21,0	32,5	278,6	504,0
Armadura Activa	22,8	26,4	271,0	396,0
Pretesa	32,5	26,4	577,0	509,0

5. CONCLUSIONES

A partir de las tablas anteriores se puede deducir que en las mismas condiciones de armado (armado pasivo, pretensado o pretensado sin tesar) las vigas con HAC-RM, muestran una menor resistencia a cortante con armadura pasiva y activa. Para las vigas pretensadas con HAC y HC los valores de resistencia a cortante fueron similares.

Existe diferencia de comportamiento en el modo de rotura entre HC y HAC al aparecer una fisura horizontal que no existe en el caso de HC. Esta fisura puede explicarse por una menor adherencia del hormigón con la barra corrugada y por una menor resistencia frente a tensiones tangenciales y, por tanto, frente al rasante.

También se aprecia una fisuración prematura y, por tanto, una menor resistencia a la tracción justificable por su menor resistencia a compresión.

El cortante último en las vigas pretensadas es la suma de tres mecanismos: el cortante del mecanismo de celosía, más el resistido por efecto arco y el compensado por el pretensado. Otra forma de entender el doble mecanismo celosía – arco es considerar la inclinación de las bielas tras la plastificación de la armadura de cortante. Estos mecanismos se han presentado en todos los casos.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (Departamento de Ingeniería de la Construcción) de la Universidad Politécnica de Cataluña, y ha recibido financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología español a través de los proyectos BIA2005-09229-C02-01/02, BIA2006-15471-C02-01/02, PSE 11-2005 /PSS-380000-2005-12/2007-1 y MAT2002-00849 (*Estudio teórico y experimental del comportamiento de piezas de hormigón frente a esfuerzo cortante. Comprobación de la actual normativa española y europea*).

Los autores quieren agradecer la colaboración de los Ingenieros de Caminos Alejandro López, Antonio Timoner Salvá, y Juan Ignacio Guinda por su apoyo en la parte experimental. Asimismo, quieren agradecer el apoyo entusiasta del personal del laboratorio, especialmente de su Director, el Ingeniero Tomás García.

REFERENCIAS

- [1] DE LA CRUZ, C., Desarrollo de Hormigones Autocompactables de Resistencia Media Para Aplicaciones Estructurales [PhD Tesis].ETSICCP de Barcelona, Octubre de 2006.
- [2] ACI (American Concrete Institute). ACI Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI 318-95, 1995.
- [3] AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación) “Eurocódigo 2, Proyecto de estructuras de hormigón”, 1998.
- [4] TIMONER, A., Influencia de la cuantía de armadura longitudinal en el comportamiento a cortante de vigas isostáticas pretesas [Tesina]. ETSICCP de Barcelona, Junio de 2005.

- [5] OKAMURA, H. Y OUCHI, M., Self-compacting concrete development, present use and future, 1st Intl. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, Ed. A. Skarendahl y Ö. Petersson, Editorial RILEM Publicaciones S.A.R.L., Cachan, Francia, 3-14, 1999.
- [6] BARTOS, P.J.M. Y GRAUERS, M., Self-compacting concrete, *Concrete.*, 33, 9-13, 1999.
- [7] Comisión Permanente Del Hormigón. Instrucción de Hormigón Estructural EHE. Ministerio de Fomento, 1999.
- [8] PETERSSON, Ö., Design of self-compacting concrete, properties of the fresh concrete, Seminar on Self-Compacting Concrete (Malmö, Suecia), 15-20, 2000.
- [9] GOMES, P., GETTU, R. Y AGULLÓ, L., El hormigón autocompactante. Propiedades y métodos de caracterización, *Hormigón y Acero*, nos. 221-222, 3º y 4º trimestre de 2001, pp. 27-37.
- [10] GUINDA RIVERO, J.I., "Influencia de la cuantía de armadura longitudinal en la resistencia a cortante en vigas de hormigón convencional y autocompactante", Tesina, ETSICCP de Barcelona, Diciembre de 2004.
- [11] ASCE-ACI Committee 445 (1998). Recent approaches to shear design of structural concrete, *Journal of Structural Engineering.*, 124, 1375-1417, 1998.
- [12] ELZANATY, A.; NILSON, A.; SLATE, FLOYD O, Shear Capacity of Prestressed High-Strength Concrete Beams, *ACI Journal, Proceedings.*, 83, 359-368, 1986.
- [13] CAMPION, M.J. Y JOST, P., Self-compacting concrete, expanding the possibilities of concrete design and placement, *Concrete International*, 22, 31-34, 2000.
- [14] CHOULLI, Y., MARI, A. R., CLADERA, A., Shear behaviour of full-scale prestressed i-beams made with self compacting concrete, *Materials and Structures.*, 41, 131-141, 2008.
- [15] NILSON, ARTHUR H. Y WINTER, G., *Diseño de Estructuras de Concreto*. McGRAW-HILL. México, 1994.
- [16] LEONHARDT, F. Y WALTHER, R. The Stuttgart shear tests 1961. *Cement and Concrete Association Library Translation*, 111, London.
- [17] ASCE-ACI Committee 426 (1973). The shear strength of reinforced concrete beams, *Journal of Structural Engineering.*, 99, 1091-1187, 1973.
- [18] LÓPEZ, A., Estudio de la influencia del pretensado en la resistencia a cortante de vigas de hormigón [Tesina], ETSICCP de Barcelona, Junio de 2005.