COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

C. Fava*, L. Bergol*, G. Fornasier, F. Giangrasso*, C. Rocco***

*** Departamento de Construcciones. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata Calle 48 y 115. CP 1900 La Plata. Argentina**

**** Centro Técnico Loma Negra. Buenos Aires. Argentina**

Resumen. En el presente trabajo se evalúan las propiedades mecánicas y de fractura de dos hormigones autocompactantes (HAC), y de sus respectivas fases mortero, elaborados con cemento compuesto (ternario) más una adición de Filler Calcáreo y Escoria Granulada de Alto Horno. Los resultados obtenidos se comparan con los correspondientes a un hormigón convencional de similar resistencia, elaborado con idénticos agregados. Se presentan resultados de energía específica de fractura, resistencia a la tracción indirecta y función de ablandamiento, obtenidos a partir de ensayos de fractura estable de probetas entalladas sometidas a flexión en tres puntos, y ensayos de compresión diametral. Dichos parámetros fueron determinados en el marco del modelo de fisura cohesiva. Adicionalmente se presentan resultados de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión (módulo de rotura) y módulo de elasticidad estático. Los resultados obtenidos indican que los parámetros de fractura de los HAC resultan similares a los correspondientes a un hormigón convencional elaborado con idénticos agregados y con similar nivel de resistencia.

Abstract. In this work, different tests were done to evaluate (in mortar and concrete phases) fracture and mechanical parameters of two Self Compacted Concrete (SCC) mixes designed using ternary blended cement with further additions of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and limestone filler. These results were compared to a conventional concrete with similar compressive strength and coarse aggregate (maximum size and type). Fracture tests were carried out to determine the fracture energy (three–point bending tests and Brazilian splitting tests). Also, the macroscopic fracture behaviour was modeled by the cohesive crack model with a bilinear softening curve analysis.
Additionally, compressive strength, flexural strength and modulus of elasticity were evaluated. The results indicates that the fracture parameters of SCC mixes are similar to the conventional vibrated concrete with similar compressive strength and coarse aggregate.

1. INTRODUCCIÓN

Los hormigones autocompactantes (HAC), también denominados autocompactables, forman parte del grupo de los denominados hormigones de alto desempeño y se muestran como un tipo de hormigón con ventajas comparativas respecto de los hormigones convencionales. Entre ellas se pueden mencionar una rápida y simple colocación sin necesidad de compactación mecánica y una excelente terminación superficial. Esto puede conducir a una reducción de costos, un incremento de la calidad y confiabilidad de las estructuras, y un mejoramiento de las condiciones de seguridad e higiene del trabajo.

Desde el punto de vista de su microestructura, existen antecedentes [1][2][3] que indican que los HAC presentan una matriz más compacta y una interface matriz-agregado de mejor calidad que la correspondiente a hormigones tradicionales de igual relación agua-material cementicio. Esto se traduce en un hormigón estructuralmente más homogéneo y potencialmente más frágil.

Actualmente su desarrollo y aplicación se ha difundido a gran cantidad de países dado que es un material que presenta alternativas muy interesantes para las construcciones de hormigón.

Si bien en la actualidad existen numerosos trabajos que describen el diseño y caracterización de los HAC, hay muy escasa información sobre los parámetros de fractura que caracterizan a los mismos.

El presente trabajo tiene por objetivo presentar los primeros resultados de caracterización de propiedades en fractura de dos hormigones autocompactantes y su comparación con las propiedades de un hormigón convencional de referencia. Para el diseño de las mezclas autocompactantes se utilizó la adición de material extra fino (Filler Calcáreo y Escoria Granulada de Alto Horno) con el objeto de obtener la estabilidad necesaria en estado fresco. El hormigón convencional fue diseñado para obtener una resistencia a compresión similar a los HAC, con el mismo tipo y tamaño máximo de agregado.

Para el estudio experimental se adopto como marco de referencia teórico el modelo de fisura cohesiva. En este contexto se realizaron determinaciones de la función de ablandamiento de los hormigones y de sus parámetros característicos: energía específica de fractura G_F, resistencia a la tracción f_t, valor crítico de la abertura de fisura w_c .

Adicionalmente se evaluó la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad estático y la resistencia a la flexión de los hormigones y de sus respectivos morteros constituyentes.

2. CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN FRACTURA

Para caracterizar el comportamiento en fractura de los hormigones estudiados en este trabajo se adoptó el modelo de fisura cohesiva introducido por Hillerborg en la década del '70 y desarrollado por J. Planas y M. Elices [4], en los últimos años. El modelo es en esencia una extensión del modelo clásico de Barenblatt [5], en el cual la zona de procesos de fractura del hormigón (zona de microfisuración y crecimiento de fisuras) se representa mediante una fisura entre cuyas caras se pueden transferir tensiones, tal como se representa esquemáticamente en la figura 1a.

A esta fisura se la denomina fisura cohesiva, y la magnitud de las tensiones σ entre sus caras depende de la apertura w a través de una función denominada función o curva de ablandamiento. Esta curva es una propiedad del material, que se determina experimentalmente y caracteriza su comportamiento en fractura.

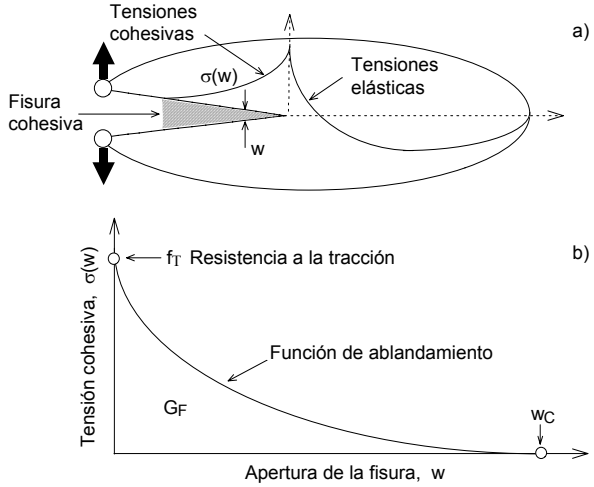


Figura 1: Fisura cohesiva y función de ablandamiento.

En la figura 1b se muestra una curva de ablandamiento típica para el hormigón donde se puede observar que dos propiedades del material asociadas con dicha curva son la resistencia a la tracción f_t, y la energía específica de fractura G_F,. Otro valor característico de la función de ablandamiento es la apertura crítica de fisura w_C que representa el valor de la apertura a partir del cual no se pueden transferir tensiones entre las caras de la fisura.

En el caso del hormigón la función de ablandamiento se puede aproximar apropiadamente mediante una función bilineal como la indicada en la figura 2. En este caso la función queda definida mediante los siguientes cuatro parámetros: resistencia a la tracción f_T, energía especifica de fractura G_F, valor de la apertura critica de la fisura w_C, y w_1 que es el punto de intersección de la rama inicial de la curva bilineal con el eje de las x. En la referencia [6] se describe en detalle el procedimiento experimental para la determinación de los cuatro parámetros de la función de ablandamiento bilineal.

Dos parámetros propios del modelo, que se definen a partir de las propiedades del material, son la longitud característica l_{ch}, que está directamente relacionada con la fragilidad del material y la longitud característica lineal equivalente l_{ch1}. Ambos parámetros se determinan a través de las siguientes expresiones:

$$l_{ch} = EG_F/f_t^2 \qquad (1)$$

$$l_{ch1} = Ew_1/2f_t \qquad (2)$$

donde E es el módulo de elasticidad, G_F es la energía específica de fractura, f_t es la resistencia a la tracción del material y w_1 es la abcisa al origen de la rama inicial de la función bilineal de ablandamiento. Para hormigones tradicionales los valores habituales de l_{ch} varían entre 80 y 600 mm siendo intrínsecamente más frágil el material cuanto más pequeño es el valor de l_{ch}.

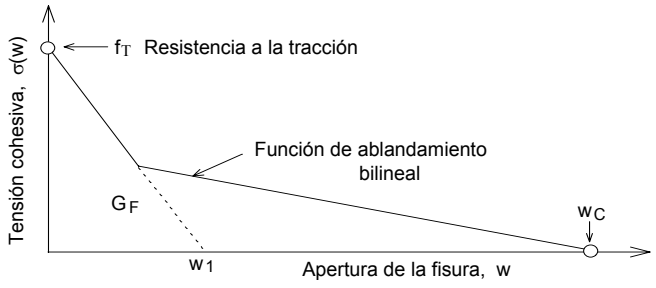


Figura 2: Función de ablandamiento bilineal.

3. MATERIALES Y ENSAYOS

3.1. Materiales componentes

Para el estudio se utilizaron materiales de uso convencional en la industria del hormigón elaborado. Como agregado grueso se utilizó una piedra partida de origen granítico, combinada en dos fracciones con un

tamaño máximo resultante de 19 mm y una densidad aproximada de 2.70 kg/dm^3. El agregado fino se obtuvo por una mezcla de dos arenas naturales silíceas de módulo de finura 1.75 y 3.10 respectivamente, ambas con una densidad de 2.63 kg/dm3.

El cemento utilizado fue del tipo Cemento Portland Compuesto (CPC40) de acuerdo a la norma IRAM 50000 [7] con el agregado de dos o más adiciones minerales de hasta el 35 %, en peso. En este caso dichas adiciones corresponden a Filler Calcáreo y Escoria Granulada de Alto Horno. Además, como agregado extra fino al hormigón, se utilizó Filler Calcáreo y Escoria Granulada de Alto Horno de Grado 100 de acuerdo a ASTM C989. Para los hormigones autocompactantes se incorporó, como aditivo químico, un superfluidificante con base policarboxilato. Para el hormigón convencional de referencia se utilizó un fluidificante con base naftaleno.

3.2. Composición y características de las mezclas

Las mezclas fueron diseñadas para obtener hormigones de similar clase resistente, con resistencias medias a compresión a 28 días cercanas a 50 MPa.

Se elaboraron dos HAC y un hormigón convencional de referencia (REF) apto para ser colocado mediante bomba. La Tabla N° 1 muestra la composición y características en estado fresco de las mezclas, siendo HACF el hormigón autocompactante con filler y HACE el hormigón autocompactante con escoria. Cabe recordar que todas las mezclas poseen igual tamaño máximo de agregado. Se muestran también los resultados de ensayos típicos para los hormigones autocompactantes (extendido o slump flow test, T50 y LBOX) cuyo detalle de ejecución se puede consultar en las referencias [8, 9, 10 y 11].

Tabla 1. Composición y características en estado fresco de las mezclas.

	Unidad	HACF	HACE	REF
Agua	Kg/m^3	172	180	161
Cemento Compuesto (CPC40)	Kg/m^3	367	250	375
Filler	Kg/m^3	238	0	0
Escoria	Kg/m^3	0	200	0
Arena	Kg/m^3	740	857	804
Piedra	Kg/m^3	853	870	1015
Dosis aditivo	% polvo	0.46	0.46	0.35
Relación agua/mat.cementicio	-	0.47	0.40	0.43
Asentamiento	cm	-	-	17
Extendido (slump flow)	cm	71	70	-
Tiempo T50	seg	2.0	1.7	-
Relación H2/H1 (LBox)	-	0.95	0.96	-

3.3. Ensayos de caracterización

Para caracterizar las propiedades mecánicas de los hormigones y de sus respectivas matrices componentes se realizaron ensayos de flexión, compresión simple y compresión diametral de probetas de hormigón y de mortero. La matriz de mortero se obtuvo por tamizado del hormigón fresco sobre el tamiz de 4,75 mm.

Las propiedades evaluadas fueron resistencia a la compresión, módulo de elasticidad estático, módulo de rotura y resistencia a la tracción indirecta.

Los ensayos de compresión se realizaron en probetas cilíndricas de 150 x 300 mm de acuerdo a la norma ASTM C39 para determinar la resistencia a compresión (f_c) y a la norma ASTM C469 para evaluar el módulo de elasticidad estático (E). La resistencia a la tracción indirecta (f_{st}) se determinó en probetas prismáticas de 100 x 100 x 75 mm siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C496, excepto por el tamaño de la probeta y el ancho de apoyo para la aplicación de la carga (igual al 10 % de la altura de la probeta). El módulo de rotura (f_f) se determinó a partir de ensayos de flexión, con carga centrada, de probetas de 50 x 75 x 200 mm, con una luz entre apoyos de 160 mm, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C293.

Todas las probetas se ensayaron en condiciones saturadas a superficie seca a la edad de 28 días. Desde las 24 horas después del moldeo hasta la edad de ensayo las probetas fueron acondicionadas en cámara húmeda a 20°C y 99% de HR. Para cada tipo de ensayo y mezcla, se ensayaron 4 probetas de hormigón y mortero respectivamente.

3.4. Ensayos de Fractura

Para determinar los parámetros de fractura se realizaron ensayos estables de flexión en tres puntos con probetas prismáticas de 75x100x400 mm, entalladas en correspondencia con el plano de aplicación de la carga hasta la mitad del canto. Los ensayos se realizaron en una máquina Instron en control de desplazamiento siguiendo la recomendación RILEM TC-50 [12] y con las modificaciones propuestas en [13, 14]. La velocidad de ensayo fue de 0.1 mm/minuto y durante los mismos se realizó un registro continuo de la carga, del desplazamiento relativo del punto de aplicación de la carga y de la apertura de la entalla en correspondencia con el canto inferior de la probeta, CMOD.

Las probetas se ensayaron con compensación del peso propio en estado saturado a superficie seca. Para cada tipo de hormigón se moldearon y ensayaron 4 probetas.

4. RESULTADO DE LOS ENSAYOS

4.1 Ensayos de caracterización

En la tabla 2a se indican los resultados de los ensayos de caracterización de los hormigones estudiados y los de sus respectivas matrices de mortero. Se incluyen los

valores medios de resistencia a la compresión, f_c,, resistencia a la tracción indirecta, f_{st},, módulo de elasticidad, E, y módulo de rotura, f_f., Los valores corresponden al promedio de 4 ensayos indicándose entre paréntesis el rango de variación para los valores extremos.

Tabla 2a. Propiedades estándar de los hormigones y sus matrices de mortero.

	f_{st} (MPa)	f_f (MPa)	f_c (MPa)	E (GPa)
HACE	4.72 (0.76)	8.85 (0.81)	51.2	38.3
HACF	3.83 (0.42)	7.48 (0.97)	48.5	35.4
HC	4.27 (0.31)	6.85 (0.78)	48.6	38.0
MHACE	5.16 (0.45)	11.1 (0.76)	54.1	33.6
MHACF	3.67 (0.22)	7.53 (0.79)	52.4	33.7
MHC	4.18 (0.24)	7.91 (0.62)	50.4	33.1

Nota: Entre paréntesis se indica la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo obtenido en los ensayos

4.2. Ensayos de Fractura

En la tabla 2b se indican los parámetros principales de dichas curvas, calculados siguiendo el procedimiento descripto en [6]. En la tabla se incluyen los valores de la longitud característica calculados según la expresión (1). En todos los casos, los valores corresponden al promedio de 4 ensayos indicándose entre paréntesis el rango de variación para los valores extremos. Como valor de la resistencia a la tracción se adoptó el valor de la resistencia a la tracción indirecta. Según [15, 16], se puede asumir que con el ancho de apoyo utilizado en los ensayos de tracción indirecta, los valores obtenidos se aproximan a los de tracción directa.

Tabla 2b. Parámetros de la curva de ablandamiento

	f_t (MPa)	G_F (N/m)	w_1 (μm)	w_c (μm)	l_{ch} (mm)
HACE	4.72 (0.76)	162 (12)	31 (7)	313 (70)	278
HACF	3.83 (0.42)	170 (46)	41 (6)	308 (99)	410
HC	4.27 (0.31)	145 (54)	23 (19)	310 (150)	302

Nota: Entre paréntesis se indica la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo obtenido en los ensayos

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la figura 3 se muestran las curvas de ablandamiento bilineal, representativas de los hormigones ensayados, obtenidas a partir de los ensayos de flexión y compresión diametral. Se puede observar que los hormigones autocompactantes (HACE y HACF) presentan un comportamiento similar al hormigón convencional de referencia (HC). En particular, la cola de la curva de ablandamiento es prácticamente coincidente en los 3 hormigones, lo que denota que el mecanismo de transferencia de tensiones, durante el crecimiento y propagación de fisuras en la zona de procesos de fractura es similar. Nótese que la apertura crítica de fisura, w_c en los tres hormigones es muy parecida con valores medios que varían entre 308 y 313 μm. Cabe indicar que el análisis "postmortem" de las superficies de fractura permitió determinar que el porcentaje de partículas de agregado grueso fracturadas y de fallas de interface en los hormigones autocompactantes fue similar que en el hormigón convencional.

Respecto a la parte inicial de la curva de ablandamiento, se puede observar que el hormigón autocompactante con adición de escoria (HACE) presenta una resistencia a la tracción un 10% mayor que en el hormigón convencional, mientras que en el caso del hormigón autocompactante con adición de filler (HACF), esta resistencia se encuentra un 9% por debajo. Este comportamiento de la parte inicial de la curva, se encuentra controlado principalmente por las propiedades en tracción de la matriz. En efecto, los resultados de las resistencias a la tracción de los respectivos mortero (ver tabla 2a) muestran un comportamiento similar al observado con la resistencia a la tracción del hormigón.

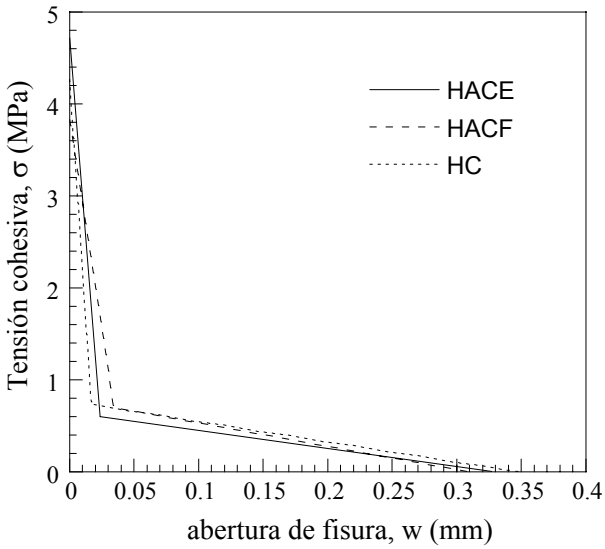


Figura 3: Funciones de ablandamiento representativas de los hormigones ensayados.

En la figura 4 se representan las mismas curvas de ablandamiento de la figura 3 pero adimensionalizadas en función de la energía específica de fractura y de la resistencia a la tracción. En la misma figura se incluye, en trazo grueso, la curva de ablandamiento que predice el CEB para hormigones convencionales con un nivel de resistencia a la compresión y tamaño máximo similares a los ensayados en esta experiencia. Se puede observar que el hormigón autocompactante con escoria

HACE, presenta una curva de ablandamiento adimensionalizada que coincide prácticamente con la del hormigón convencional y se ajusta muy bien a la curva de estimación que recomienda el CEB. Respecto al hormigón autocompactante con filler HACF, si bien la rama inicial de la curva coincide con los otros hormigones y con la curva del CEB, la cola de la curva denota un comportamiento diferente. Se puede ver que el HACF presenta una cola menos extendida con un valor adimenionalizado de la apertura crítica de fisura que resulta inferior al del hormigón convencional. Este tipo de tendencia es característico en materiales donde las propiedades mecánicas de las fases constituyentes resultan más homogéneas.

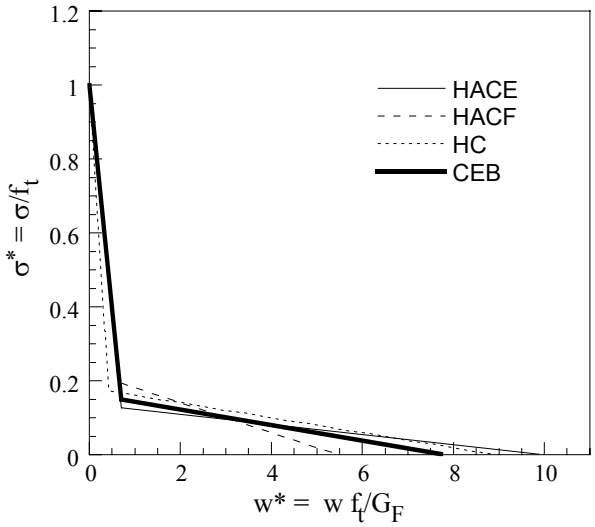


Figura 4: Funciones de ablandamiento adimensionalizadas.

En los diagramas de barras de la figura 5 se muestran los resultados de la energía específica de fractura G_F y de la longitud característica l_{ch} de los hormigones. Se observa que los hormigones autocompactantes, HACE y HACF, presentan valores similares de energía específica de fractura, con valores medios que varían entre 145 y 170 N/m. Respecto a la longitud característica los valores medios obtenidos varían entre 278 y 410 mm. Si se tiene en cuenta que la longitud característica es un parámetro asociado con la fragilidad del material se puede establecer, en base a estos resultados, que el comportamiento estructural de los hormigones autocompatantes es similar al de un hormigón convencional. Tanto los valores de energía de fractura como de la longitud característica se encuentran dentro del rango de valores típicos correspondientes a hormigones convencionales de similar nivel de resistencia.

En la figura 6 se muestran los resultados individuales de la resistencia a la flexión correspondientes a los hormigones. Dichos resultados se muestran en función de la longitud característica, l_{ch1} calculada con la expresión (2) a partir de los parámetros de fractura medidos experimentalmente. En la misma figura se incluye la curva de predicción teórica obtenida con el modelo de fisura cohesiva. Se puede observar que los resultados obtenidos se ajustan razonablemente bien a la curva que predice el modelo. Se puede ver que, desde el punto de vista de la resistencia a la flexión, los hormigones autocompactantes presentan un comportamiento ligeramente superior al hormigón convencional, destacándose en particular el hormigón con adición de filler, HACF.

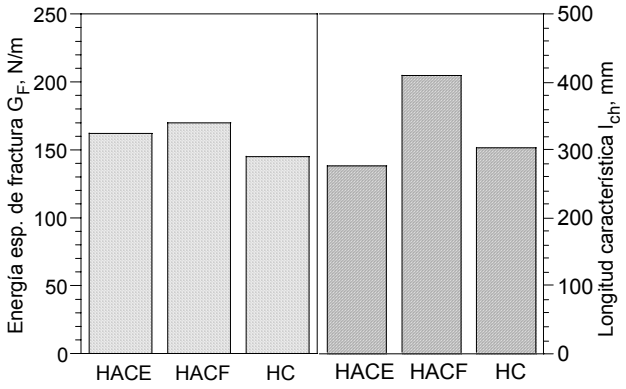


Figura 5: Energía específica de fractura y longitud característica.

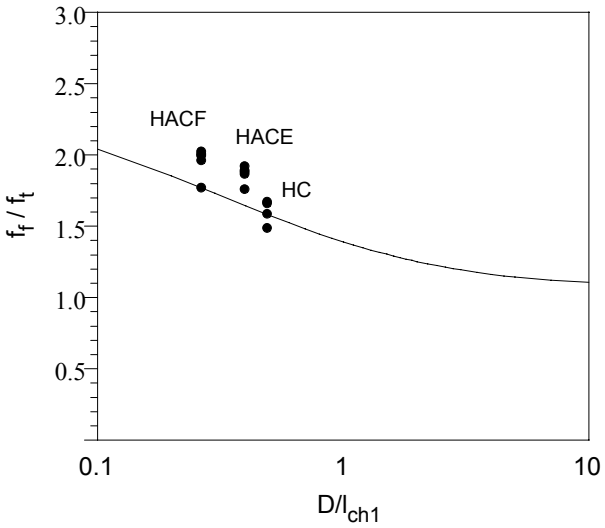


Figura 6: Resistencia a la flexión: curva de efecto del tamaño.

6. CONCLUSIONES

En base a estas primeras experiencias se pueden establecer las siguientes consideraciones:

- Los hormigones autocompactantes HAC, presentan un comportamiento en fractura similar al de un hormigón convencional HC, de igual nivel de resistencia, elaborado con idénticos agregados.

- Las funciones de ablandamiento de los HAC se ajustan razonablemente bien a las funciones de ablandamiento recomendadas por el CEB para hormigones convencionales.
- Las energías de fractura medias de los HAC variaron entre 145 N/m y 170 N/m. Estos valores resultan típicos en hormigones convencionales con niveles de resistencia y tamaños máximos de agregados como los de los HAC ensayados.

- Las longitudes características l_{ch} obtenidas en los HAC denotan que desde el punto de vista de la fragilidad estructural, los HAC resultan similares a los hormigones convencionales. En esta experiencia los valores medios de l_{ch} variaron entre 278 mm y 410 mm.

- Se ha podido establecer que la resistencia a la flexión de los HAC se puede predecir con una buena aproximación a través del modelo de fisura cohesiva.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Claudio Rimoldi del Departamento de Aeronáutica y al técnico Enrique Ferreira Hirsch del Departamento de Construcciones (Facultad de Ingeniería, UNLP), por el apoyo brindado durante la realización de los ensayos.

REFERENCIAS

[1] Tragardh. "Microstructural features and related properties of SCC". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia, pp. 175-186, 1999.

[2] Zhu, Quinn, Bartos. "Transport properties and durability of self compacted concrete". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. pp. 451-458, 2001.

[3] Skarendall "Market acceptance of SCC, the Swedish experience". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón, pp. 1-12, 2001.

[4]. Planas, J. And Elices, M. "Nonlinear fracture of cohesive materials". International Journal of Fracture 51, pp 139-157, 1991.

[5]. Barenblatt, G., J. "The mathematical theory of equilibrium crack in brittle fracture". Advance Applayed Mechanics, 7, pp 55-125, 1962.

[6]. Guinea, G., Planas, J. And Elices, M. "A general bilinear fit for the softening curve of concrete". Materials and Structures, 27, pp 99-105, 1994.

[7]. Instituto Argentino de Normalización. Norma IRAM 50000. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de conformidad y condiciones de recepción.

[8] Okamura, Ozawa y Kazumasa. "Mix design for self-compacting concrete". Concrete Library of JSCE N° 25, pp. 107-120, Junio, 1995.

[9] Ouchi, Masahiro. "State of the art report: self-compactability evaluation for mix proportioning and inspection". International Workshop on Self-Compacting Concrete. Kochi, Japón, pp.115-136, 1998.

[10] Technical Committee 174 – SCC - RILEM Report 33, 2000.

[11] G. Fornasier, C. Fava, L. Zitzer. "Self Compacting Concrete in Argentina – The First Experience". 2nd International Symposium on Self Compacting Concrete. University of Tokyo, Japan, 2001.

[12] RILEM 50-FMC Committee. "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend tests on notched beams", Materials and Structures, RILEM, Paris, V 18, Nº 106, pp. 285-290, 1985.

[13] Guinea, G. V., Planas, J. and Elices, M. "Measurement of the fracture energy using three-point venid test: Part 1-Influence of experimental procedure". Materials and Structures, 25, pp. 212-218, 1992.

[14] Elices, M., Guinea, G. V.and Planas, J. "Measurement of the fracture energy using three-point venid test: Part 3-Influence of cutting the P-δ tail". Materials and Structures, 25, pp. 327-334, 1992.

[15] C. Rocco, G. Guinea, J. Planas and M. Elices. "Size effect and boundary conditions in the brazilian test: theoretycal analysis". Materials and Structures. V32, pp-210-217,1999.

[16] C. Rocco, G. Guinea, J. Planas and M. Elices. "Size effect and boundary conditions in the brazilian test: experimental validation". Materials and Structures. V32, pp-210-217, 1999.