

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO

J.L. SANCHEZ

Profesor
Escuela Técnica Superior de Edificación
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid; España
e-mail joseluis.sanchezp@upm.es

A. COBO

Profesor
Escuela Técnica Superior de Edificación
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid; España
e-mail alfonso.cobo@upm.es

B. DÍAZ

Distribution Segment Manager
Lafarge España
Madrid, España
e-mail borja.diaz@lafarge.com

M.A. VIDAL

Responsable de Desarrollo Nuevos Productos AyH
Lafarge España
Madrid, España
e-mail maria-angeles.vidal@lafarge.com

RESUMEN

El hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero presenta simultáneamente las ventajas de los hormigones autocompactantes y de los reforzados con fibras. Se consigue un material de altas prestaciones con mayor tenacidad y ductilidad. En este trabajo se ha estudiado el comportamiento mecánico de un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero. Se han realizado ensayos a compresión, tracción y flexión a distintas edades; así como ensayos no destructivos (medida de la velocidad de ultrasonidos e índice esclerométrico). Los resultados muestran la variación de la respuesta del hormigón con el tiempo y la diferencia existente con hormigones tradicionales.

1. INTRODUCCION

Se analiza en este trabajo el comportamiento de un hormigón que combina dos aspectos de los llamados “hormigones especiales”. Por un lado el Hormigón Reforzado con fibras (HRF), concretamente con fibras de acero (HRFA) y por otro el Hormigón Autocompactante (HAC). Resultando así un material que aúna las características de ambos procurando las mejoras que produce cada uno de ellos sobre el hormigón convencional como son la capacidad para llenar completamente un encofrado alcanzando una plena compactación del hormigón del hormigón autocompactante, y un aumento de la tenacidad, de la ductilidad, de la resistencia a punzonamiento, aumento de resistencia a cortante e incremento de la carga máxima respecto del hormigón en masa que procuran la adicción de fibras

El hormigón autocompactante tiene una breve historia frente al uso de refuerzo de fibras.

A partir del año 1983 se inicia en Japón una línea de investigación a cargo del profesor Okamura [1] que concluye en 1988 por el profesor Ozawa con un prototipo de hormigón colocable en obra sin ningún tipo de compactación, denominado en un principio “High Performance concrete” para años más tarde denominarse hormigón Autocompactante (Self Compacting Concrete). De 1989 data la primera publicación en la Conferencia de Ingeniería Estructural del Este de Asia y Pacífico, se presenta en 1992 en el meeting del American Concrete Institute, y en 2007 se publican las primeras normas UNE,

Respecto del refuerzo con fibras, desde la antigüedad se realiza la adición de fibras para mejorar las características de materiales de construcción, como el uso de crines de caballo o de paja en el adobe, de 1900 datan las fibras de asbesto (Hatscheck), en 1935 se desarrollan las fibras sintéticas y el Nylon (Dupont). La primera patente de hormigón reforzado con acero granular procedente de desechos por A. Berard en California data de 1874, y en 1927 G. Martín realiza una patente sobre hormigón reforzado con alambres rizados de acero para tuberías, y en 1943 Constantinescu en Inglaterra patenta un hormigón reforzado con fibras helicoidales y espirales para pavimentos de carros de combate, refugios...a partir de 1970 comienza su uso en España.

Desde una perspectiva histórica podemos afirmar que el inconveniente tradicional del mortero y el hormigón es su baja resistencia a tracción y alta fragilidad. Para controlar estos factores surge el uso de refuerzos, bien localizado a tracción, como es el Hormigón Armado o bien un refuerzo distribuido a fisuración como hace el Hormigón reforzado con Fibras. Así el refuerzo con fibras encuentra su aplicación en pavimentos industriales, tableros de puentes, revestimiento de túneles, prefabricación...

El HAC comparte muchas de estas aplicaciones, tanto los prefabricados donde el acabado superficial del HAC supera al tradicional, y su ejecución es más sencilla, como en pavimentos especiales, y en elementos estructurales que por su dimensión o forma exigen un escurrimiento mayor del preparado.

2. OBJETIVOS

El Hormigón con Fibras de Acero (SFRC) posee un comportamiento mecánico sustancialmente distinto al del Hormigón Convencional (CC) lo que supone dos consecuencias inmediatas para su empleo en estructuras de edificación. En primer lugar, para poder dimensionar elementos estructurales, es necesario tener una caracterización mecánica del material. En segundo lugar, se precisa saber las variaciones que respecto al CC se producirán en el dimensionamiento frente a Estados Límites Últimos y Estados Límites de Servicio. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos acerca de la caracterización mecánica a compresión de un hormigón reforzado con fibras de acero.

3. MATERIALES Y TÉCNICAS UTILIZADAS

El hormigón objeto de este estudio experimental parte de una amasada realizada el 03/03/2014 en la planta de la empresa LAFARGE en Alcobendas, Madrid, pertenece este hormigón a la marca comercial de AGILIA METAL.

Su denominación según la instrucción EHE08 [2] es HA-25/AC/12/IIa. Para su fabricación se ha empleado cemento CEM II/A-M (P-V) 42,5 R fabricado por Lafarge, con un contenido de 350 Kg/m³ una relación agua cemento de 0,56 al que como aditivos se añaden Plastificante 1,9 y Superplastificante 5,8. Las fibras usadas como refuerzo son las denominadas “Dramix” de Bekaert, fibra trefilada en frío de 50 mm de longitud y 0.62 mm. de diámetro, con una dosificación de 10 kg/m³

Los ensayos a compresión se realizan en probetas cilíndricas de 10 mm de diámetro y 300 mm de altura y cúbicas de 150 mm. de lado, en la Tabla 1 se indican las denominaciones utilizadas, pesos y edades de las probetas ensayadas.

Tabla 1 – Denominación y pesos de las probetas ensayadas

	CILINDRICAS		CUBICAS	
	PROBETA	PESO Kg	PROBETA	PESO Kg
7 DIAS	ACC7D1	12,055	ACQ7D1	7,943
	ACC7D5	12,096	ACQ7D2	7,878
	ACC7D6	12,230		
14 DIAS	ACC14D1	12,246	ACQ14D1	7,915
	ACC14D3	12,091	ACQ14D2	7,858
	ACC14D6	12,120		
28 DIAS	ACC28D1	12,262	ACQ28D1	7,888
	ACC28D2	12,326	ACQ28D2	7,860
	ACC28D3	12,343		
90 DIAS	ACC90D1	12,385	ACQ90D1	7,888
	ACC90D2	12,120	ACQ90D2	7,915
	ACC90D3	12,297		

Ensayos realizados

Ensayo a Compresión

Probetas cilíndricas: Se ensayan tres probetas a compresión hasta rotura a las edades de 7, 14, 28 y 90 días, de estas tres probetas una de ellas a cada edad se instrumentaliza con galgas extensométricas para obtener las deformaciones longitudinales y trasversales.

Probetas cúbicas: Dos probetas a cada edad se someten a tres ciclos de carga y descarga hasta una tensión aproximada del 40 % del valor esperado de rotura, y tras estos ciclos se llevan hasta rotura.

El ensayo se realiza en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid, mediante la prensa universal IBERTEST MIB60-AM equipada con software wintest 32

Determinación del índice esclerométrico usando el Esclerómetro modelo N fabricado por A. Eisenhut, tomando 9 medidas sobre cada cara de probeta.

Determinación de la velocidad de Ultrasonidos, utilizando el comprobador ultrasónico de hormigón CAT. E0046-E0046/Z

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Ensayo a Compresión

En la tabla 2 se indican los resultados obtenidos en la rotura a compresión para las probetas ensayadas.

Tabla 2 – Resultados obtenidos en la rotura a compresión

PROBETAS CILINDRICAS		PROBETAS CUBICAS	
PROBETA	σ_{max} N/mm ²	PROBETA	σ_{max} N/mm ²
ACC7D1	26,68	ACQ7D1	42,71
ACC7D5	30,48	ACQ7D2	43,15
ACC7D6	30,67	ACQ14D1	50,04
ACC14D1	39,85	ACQ14D2	44,16
ACC14D3	41,88	ACQ28D1	53,32
ACC14D6	42,10	ACQ28D2	53,13
ACC28D1	41,56	ACQ90D1	54,35
ACC28D2	42,03	ACQ90D2	58,39
ACC28D3	47,10		
ACC90D1	50,04		
ACC90D2	48,72		
ACC90D3	49,22		

En la Figura 1 se muestran los valores de las tensiones medias obtenidas para cada edad y según la forma de probeta.

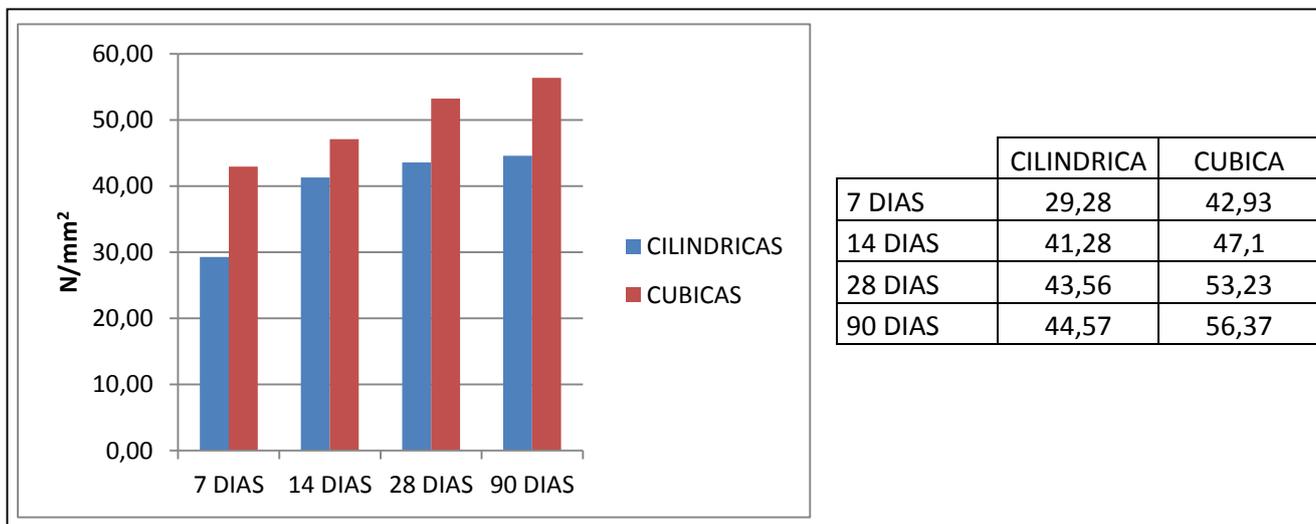


Figura 1: Comparación de las tensiones medias obtenidas a cada edad según forma de probeta

Esclerómetro

De las lecturas obtenidas se obtiene según las tablas del esclerómetro utilizado las siguientes tensiones que se comparan con las tensiones reales de rotura, en la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos a partir de las lecturas con el esclerómetro y se acompaña con los valores de tensión de rotura real alcanzado:

Tabla 3 – Resultados obtenidos de la rotura estimada con el esclerómetro y roturas reales

PROBETAS CILINDRICAS			PROBETAS CUBICAS		
	ROTURA REAL N/mm ²	ROTURA ESTIMADA N/mm ²		ROTURA REAL N/mm ²	ROTURA ESTIMADA N/mm ²
ACC7D1	26,68	25	ACQ7D1	42,71	25,62
ACC7D5	30,48	28	ACQ7D2	43,15	25,50
ACC7D6	30,67	27,5	ACQ14D1	50,04	28,50
ACC14D1	39,85	28,5	ACQ14D2	44,16	27,00
ACC14D3	41,88	29	ACQ28D1	53,32	29,00
ACC14D6	42,1	27	ACQ28D2	53,13	29,50
ACC28D1	41,56	29	ACQ90D1	54,35	34,00
ACC28D2	42,03	29,5	ACQ90D2	58,39	31,00
ACC28D3	47,1	28,5			
ACC90D1	50,04	34			
ACC90D2	48,72	31			
ACC90D3	49,22	33,5			

Ultrasonidos

En la tabla 4 se muestran los valores obtenidos a partir de la medida de la velocidad de ondas ultrasónicas y el módulo de elasticidad del hormigón obtenido a partir de estos valores.

Tabla 4 – Valores del módulo de elasticidad obtenidos a partir de la velocidad de ultrasonidos

7 DIAS	σ_{max} MPa	PESO K	PESO e K/m ³	distancia m	Tiempo μs	Velocidad m/s	E N/m ²
ACC7D1	26,68	12,055	2273,91	0,15	53,2	2,820	1660,153
				0,3	119,2	2,517	1322,754
ACC7D5	30,48	12,096	2281,64	0,15	42,3	3,546	2634,907
				0,3	97,5	3,077	1983,795
ACC7D6	30,67	12,23	2306,92	0,15	54,8	2,737	1587,339
				0,3	94,8	3,165	2121,652
VALOR MEDIO PROBETAS CILINDRICAS A LOS 7 DIAS							1885,100
ACQ7D1	42,71	7,943	2353,48	0,15	34,9	4,298	3992,628
				0,15	35,2	4,261	3924,862
ACQ7D2	43,15	7,878	2334,22	0,15	38,5	3,896	3254,016
				0,15	40,5	3,704	2940,567
VALOR MEDIO PROBETAS CUBICAS A LOS 7 DIAS							3528,018
14 DIAS	σ_{max} MPa	PESO K	PESO e K/m ³	distancia m	Tiempo μs	Velocidad v m/s	E N/m ²
ACC14D1	39,85	12,246	2309,93	0,15	38	3,947	3305,456
				0,3	70,5	4,255	3841,318

ACC14D3	41,88	12,091	2280,70	0,15	38,1	3,937	3246,509
				0,3	107,4	2,793	1634,248
ACC14D6	42,1	12,12	2286,17	0,15	38,3	3,916	3220,397
				0,3	109,7	2,735	1570,195
VALOR MEDIO PROBETAS CILINDRICAS A LOS 14 DIAS							2803,020
ACQ14D1	50,04	7,915	2345,19	0,15	34,8	4,310	4001,452
				0,15	35,3	4,249	3888,899
ACQ14D2	44,61	7,858	2328,30	0,15	35	4,286	3927,364
				0,15	37,2	4,032	3476,573
VALOR MEDIO PROBETAS CUBICAS A LOS 14 DIAS							3823,572
28 DIAS	σ_{max} MPa	PESO K	PESO e K/m3	distancia m	Tiempo μs	Velocidad v m/s	E N/m2
ACC28D1	41,56	12,262	2312,95	0,15	35,2	4,261	3857,272
				0,3	83,1	3,610	2768,366
ACC28D2	42,03	12,326	2325,02	0,15	36	4,167	3706,990
				0,3	68,2	4,399	4131,594
ACC28D3	47,1	12,343	2328,23	0,15	37,1	4,043	3495,242
				0,3	71	4,225	3817,406
VALOR MEDIO PROBETAS CILINDRICAS A LOS 28 DIAS							3629,478
ACQ28D1	53,32	7,888	2337,19	0,15	36,2	4,144	3685,318
				0,15	35	4,286	3942,357
ACQ28D2	53,13	7,86	2328,89	0,15	36,6	4,098	3592,407
				0,15	34,3	4,373	4090,341
VALOR MEDIO PROBETAS CUBICAS A LOS 28 DIAS							3827,606
90 DIAS	σ_{max} MPa	PESO K	PESO e K/m3	distancia m	Tiempo μs	Velocidad v m/s	E N/m2
ACC90D1	50,04	12,385	2336,15	0,15	37,8	3,968	3378,444
				0,3	65,7	4,566	4473,316
ACC90D2	48,72	12,12	2286,17	0,15	38,7	3,876	3154,169
				0,3	69,2	4,335	3945,978
ACC90D3	49,22	12,297	2319,55	0,15	37,1	4,043	3482,215
				0,3	80	3,750	2995,598
VALOR MEDIO PROBETAS CILINDRICAS A LOS 90 DIAS							3571,620
ACQ90D1	54,35	7,888	2337,19	0,15	34,4	4,360	4081,081
				0,15	37,2	4,032	3489,845
ACQ90D2	58,39	7,915	2345,19	0,15	34	4,412	4191,971
				0,15	37,6	3,989	3427,681
VALOR MEDIO PROBETAS CUBICAS A LOS 90 DIAS							3797,645

La comparación de los valores obtenidos de este módulo son:

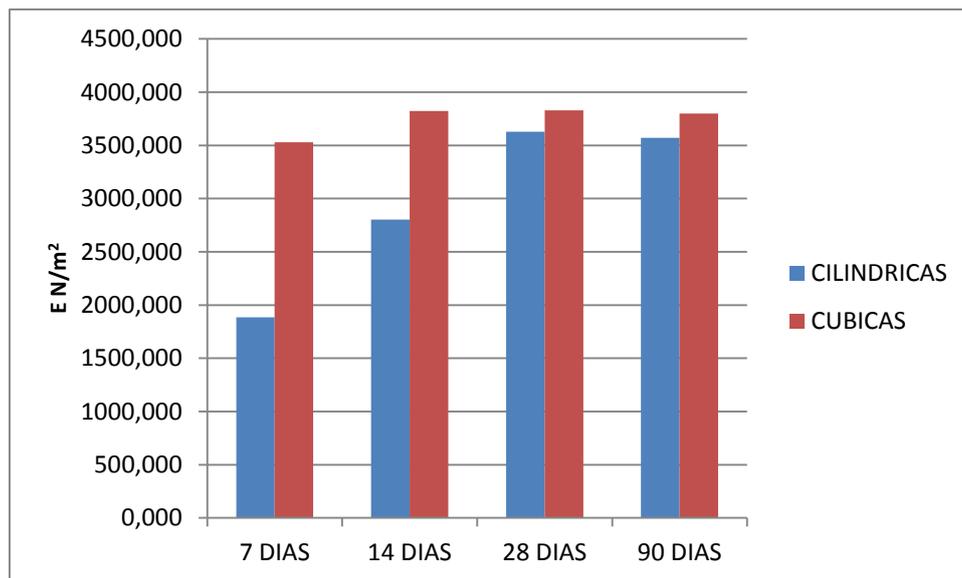


Figura 2: Comparación de los valores de E obtenidos según la forma de la probeta.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Evaluación del modelo de predicción de la EHE08 para la obtención de valores a partir de la resistencia a 28 días.

La Instrucción EHE 08 [2] establece que si no se dispone más que de resultados de ensayos a 28 días se puede estimar la resistencia a *j* días según la fórmula:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (1)$$

con: $\beta_{cc} = \exp\{s[1-28/t]^{1/2}\}$

donde: f_{cm} Resistencia media obtenida mediante ensayo a los 28 días

β_{cc} Coeficiente que depende de la edad del hormigón

t Edad del hormigón en días

s Coeficiente que depende de la velocidad de endurecimiento del cemento, en nuestro caso cemento rápido, $s=0.2$

En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos según la expresión y su comparación con los obtenidos en el ensayo con su desviación.

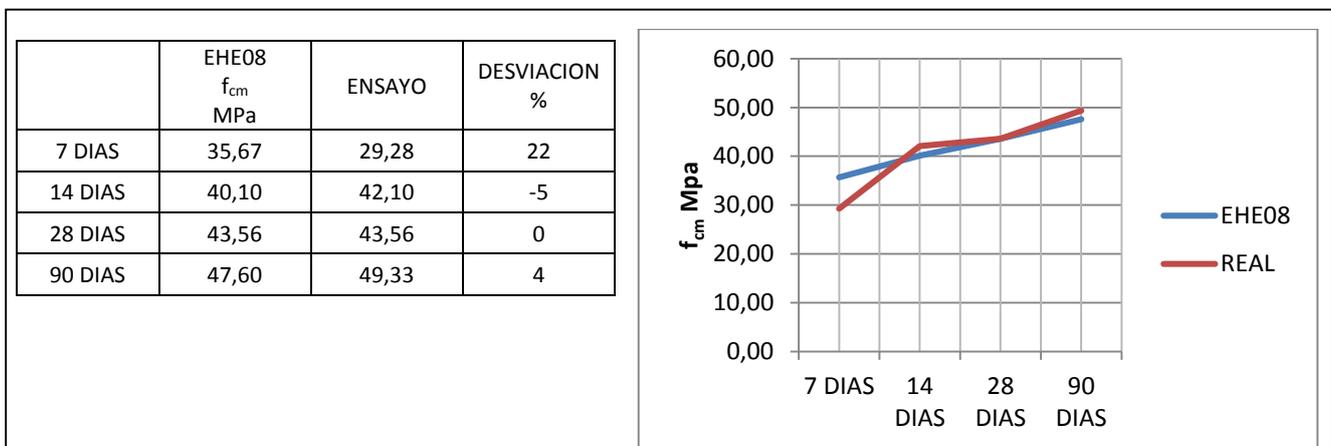


Figura 3: Comparación de los valores obtenidos reales con los predictivos de la instrucción.

A partir de los resultados obtenidos se puede comprobar que existe un buen ajuste entre los valores obtenidos de rotura a compresión y los valores estimados a partir de la instrucción EHE08, con diferencias no superiores al 5%. para la edad de 7 días se han encontrado una diferencia superior (22%) entre los valores estimados y los reales, de modo que la

estimación de la resistencia de la EHE08 ha sido muy optimista indicando valores un 22 % superiores a los obtenidos en el ensayo.

Módulo de deformación y evaluación de los modelos predictivos

Se estudia la aplicabilidad de los modelos de cálculo para estimar el módulo de deformación del hormigón indicados por las normativas EHE 2008 [2], Eurocódigo 2 [3], Código Modelo [4] y ACI-08 [5], partir de los ensayos se obtienen los valores del módulo de deformación E a las distintas edades, y se comparan con los valores predictivos de las diferentes normativas, según las expresiones:

$$E_{c,EHE08/EC2} = 8500 \cdot f_{cm}^{1/3} \quad (2)$$

$$E_{c,CM90} = 2,15 \cdot 10^4 (f_{cm}/10)^{1/3} \quad (3)$$

$$E_{c,ACI-08} = W_c \cdot 0,043 f_c^{1/2} \quad (4)$$

Los datos obtenidos Se muestran en la Figura 4

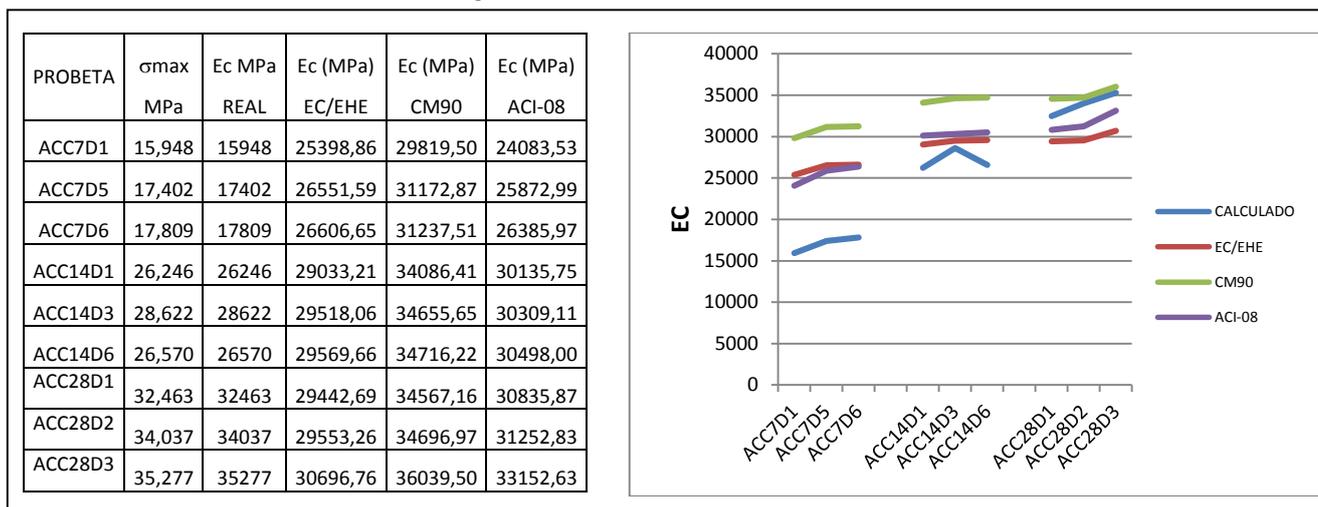


Figura 4: Comparación de los valores obtenidos reales con los predictivos de las normativas.

Se observa que los valores estimados por las distintas normas analizadas quedan por encima del valor real obtenido, el mejor ajuste se encuentra a la edad de 28 días , mientras que para 14 días el ajuste es intermedio. En cualquier caso, el valor real siempre queda por debajo de las estimaciones para edades de 7 y 14 días, los valores reales superan a los estimados por ACI, EHE y EC quedando por debajo de la predicción del CM.

Esclerómetro

La resistencia esperada según el ensayo esclerométrico y las tensiones de rotura reales obtenidas se comparan en las figuras 5 y 6 según la forma de la probeta, donde se observa que a partir de los datos del ensayo esclerométrico, las tensiones apenas aumentan con la edad de la probeta, mientras que en los valores obtenidos de la rotura real, lo hacen en mucha mayor medida, encontrando sólo coincidencia en los valores obtenidos para probetas cilíndricas y para la edad de 7 días, alejándose los valores en mayor medida para edades mayores.

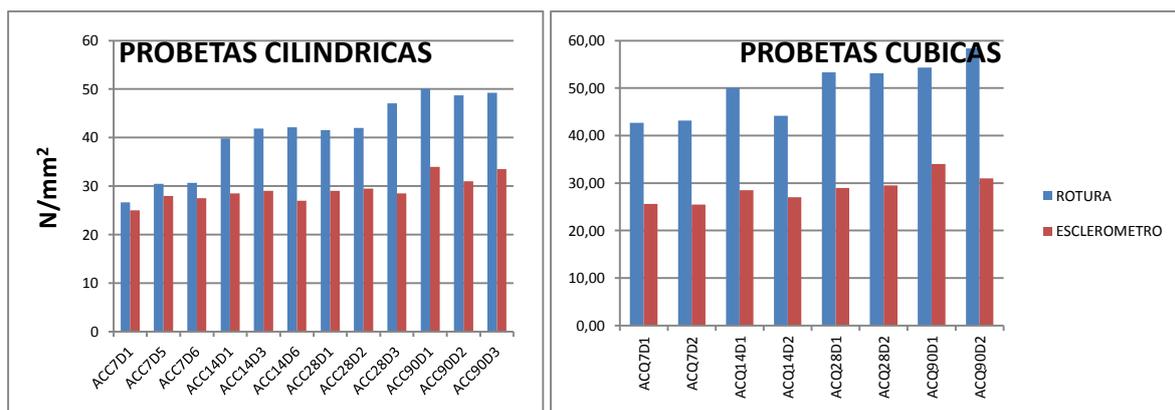


Figura 5: Comparación de los valores obtenidos reales con los obtenidos por el ensayo esclerométrico

Velocidad de Ultrasonidos

La comparación de los valores del módulo E obtenidos a partir de las gráficas tensión/deformación y las obtenidas en el ensayo de ultrasonidos se muestran en la Figura 6:

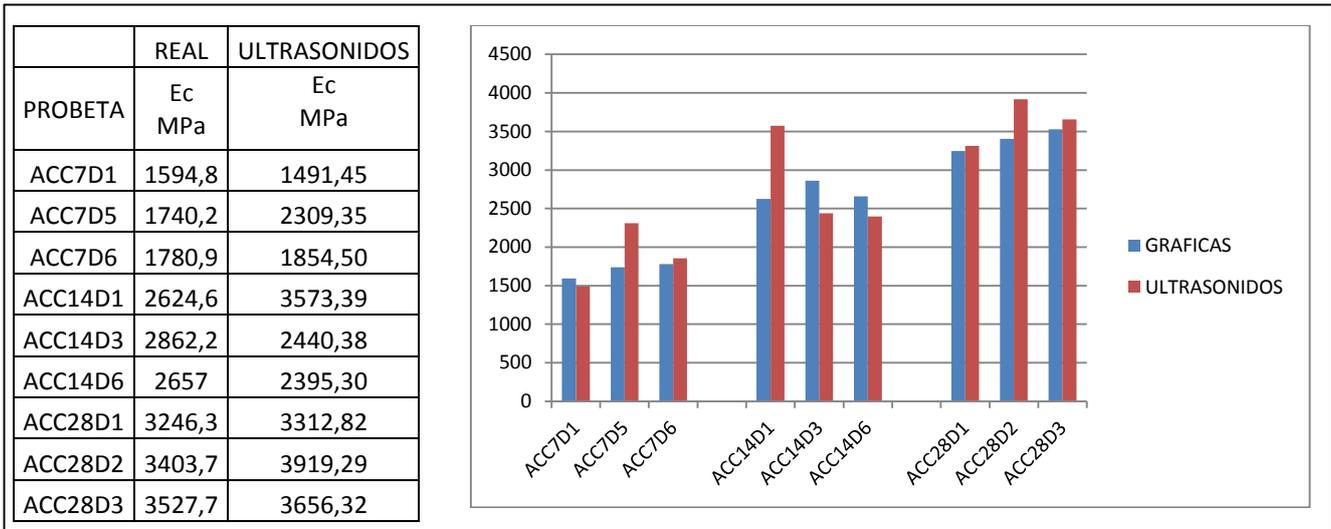


Figura 6: Comparación de los valores obtenidos reales del módulo de elasticidad con los obtenidos en el ensayo de ultrasonidos.

No se observa un patrón de comportamiento uniforme entre los valores obtenidos del ensayo de ultrasonidos y los valores reales, aunque el ajuste en los valores medios es aceptable. El valor obtenido en el ensayo de ultrasonidos es en general mayor que el real.

6. CONCLUSIONES

La estimación de la resistencia a compresión utilizando la expresión de la EHE08 ofrece valores que no difieren en más de un 5 % con los reales para edades de 14 y 90 días, en el caso de una edad de 7 días la diferencia obtenida es de un 22 % mayor la estimada que la real.

Los métodos predictivos para conocer el módulo de deformación, dados por las normativas estudiadas tienen un pésimo ajuste al valor real obtenido a los 7 días, mientras que se aproximan más, aún siendo todos superiores, a los 14 días y ofrecen un buen ajuste a la edad de 28 días, siendo el valor obtenido por el Código Modelo siempre superior al real obtenido.

El ensayo esclerométrico sólo ofrece buenos ajustes de valores con las tensiones reales obtenidas para probetas cilíndricas y a edad de 7 días. Los valores reales se alejan de los estimados a medida que aumenta la edad de las probetas, siendo además superiores, cada vez más superiores a los obtenidos en este ensayo con la edad de las probetas, siendo siempre. La diferencia es siempre mayor en las probetas cúbicas.

El ensayo de ultrasonidos para predecir el valor del módulo de deformación del hormigón ofrece unos valores aceptables respecto a los reales.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación y ayuda prestada por la empresa Lafarge, necesario para la realización de este trabajo.

8. REFERENCIAS

- [1] Okamura, H. *Self Compacting High-Performance Concrete*. Journal of Concrete International vol. 19, nº7, 1977 p. 50-54
- [2] EHE 2008. Instrucción Española de Hormigón Estructural 2008. Ministerio de Fomento, Madrid.
- [3] CEB-CIP: *CEB-FIB Model Code (1990)*, Lausanne (Switzerland 1991)
- [4] CEN: *Eurocode2 EC2*, Brussels, Belgium (1992)
- [5] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE: *Commite 318 Building Code for Structural Concrete, ACI 318-08. ACI Manual of Concrete practice 2008*. Detroit (2008)