

**3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante
Avances y oportunidades
Madrid, 3 y 4 de Diciembre de 2012**

**Estimación de la resistencia in situ de un HAC mediante la
resistencia de probetas testigo**

L. Rojas Henao

Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S.I de Caminos, Canales y
Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

J. Fernández Gómez

Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S.I de Caminos, Canales y
Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

J. C. López Agüi

Departamento de Ingeniería de Materiales, E.T.S.I de Minas, Universidad Politécnica
de Madrid, España.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo establecer algunos factores de corrección que afectan el resultado de la resistencia de las probetas testigo a fin de pronosticar la resistencia a compresión in situ. Para el cumplimiento de dicho objetivo se han fabricado 30 bloques de 500x500x1000 mm en Hormigón Autocompactante (HAC) cubriendo un amplio rango de resistencias de 20 MPa a 80 MPa. De estos bloques se han extraído 360 probetas testigo con variaciones en el diámetro (50 mm, 75 mm y 100 mm), en la dirección de extracción (horizontal y vertical) y en la condición de humedad (secas y húmedas).

Para el pronóstico de la resistencia in situ se ha considerado el principio de superposición de efectos establecido en normas como la ACI-214.4R-10. En este sentido, para las condiciones del ensayo, se han cuantificado mediante factores de corrección los efectos generados por el diámetro y la condición de humedad del testigo en el momento del ensayo y por el nivel resistente del hormigón. Además, se ha valorado de manera conjunta la influencia de las variables intrínsecas de las probetas testigo, tales como, microfisuración, efecto pared, condiciones de contorno, etc.

Los resultados indicaron que algunos factores de corrección utilizados para pronosticar la resistencia in situ, inciden de forma muy diferente en los HAC con respecto a los hormigones vibrados tradicionalmente (HVT).

PALABRAS CLAVE: Hormigón autocompactante, probetas testigo, resistencia *in situ*.

Estimación de la resistencia in situ de HAC mediante la resistencia de testigos

1.- INTRODUCCIÓN

El ensayo a compresión de probetas testigo es el método más directo para determinar la resistencia a compresión de una estructura de hormigón (ACI 214.4R-10, BS 6089:1981). La interpretación de los resultados de la rotura de probetas testigo se ha aplicado con generalidad sin importar el tipo de hormigón. Este método de ensayo ha sido muy estudiado y practicado en los hormigones vibrados tradicionalmente (HVT), pero no existen estudios suficientes sobre su adecuación y correcta interpretación en algunos de los nuevos tipos de hormigones, específicamente en el HAC.

Dada la influencia del grado de compactación diferencial entre el HVT y el HAC podría preverse que fueran a emerger nuevas diferencias puestas de manifiesto por el ensayo de resistencia a compresión de probetas testigo.

En este estudio se pretende verificar el comportamiento del ensayo a compresión de probetas testigo en un HAC mediante un procedimiento que pronostique la resistencia equivalente *in situ* a través de la resistencia del testigo. Para este procedimiento se han deducido algunos factores que corrigen la resistencia de la probeta testigo para las condiciones específicas de este estudio.

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

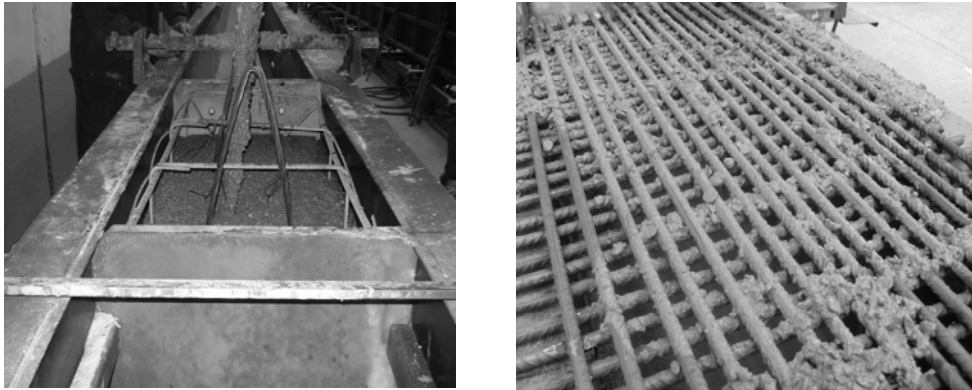
El HAC utilizado en este estudio proviene de una empresa de prefabricados Española, y forma parte de la producción habitual de sus diferentes piezas (Tabla 1). En la fabricación del HAC se ha utilizado cemento Portland tipo I-52,5R y un tamaño máximo del árido de 12 mm. Además el rango de resistencias de las mezclas varió entre 20 MPa y 80 MPa. Asimismo los resultados del ensayo de escurrimiento de las mezclas de HAC variaron entre 665 mm y 750 mm y los resultados del coeficiente de bloqueo obtenidos del ensayo de la caja en L variaron entre 0,83 y 0,95.

Tabla 1. Proporciones de la mezcla de HAC

<i>Ár. fino</i> [kg/m ³]	<i>Ár. Grueso</i> [kg/m ³]	<i>Cemento</i> [kg/m ³]	<i>Aditivo</i> [L/m ³]	<i>Filler</i> [(kg/m ³)]	<i>Agua</i> [L/m ³]	<i>Relación</i> A/C
800-943	720-840	330-420	6-7	150-200	150-190	0,38-0,55

Para simular el hormigonado con altas cuantías de armadura, 14 de los 30 bloques fueron fabricados vertiendo el HAC a través de una malla de barras de 12 mm de diámetro con una cuadrícula de 20x20 mm situada sobre el borde superior del encofrado (Fig.1). Las condiciones de curado de los bloques y probetas moldeadas fueron las mismas, es decir, regados con agua en un patio de curado durante cinco días y el tiempo restante al aire y en ambiente de laboratorio.

Con la mezcla de HAC se han fabricado 30 bloques de 500x500x1000 mm. De cada uno de los bloques se extrajeron 12 testigos, seis en sentido perpendicular (horizontal) y las otras seis en sentido paralelo (vertical) a la dirección de hormigonado. Los diámetros considerados fueron 50 mm, 75 mm y 100 mm, con una esbeltez de 2. Una vez extraídos los testigos, la mitad de ellos fueron sumergidos en agua durante 48 horas y los restantes estuvieron en condiciones secas en ambiente de laboratorio.



a) Paso del hormigón sin restricción

b) Paso del hormigón con restricción

Figura 1. Hormigonado de las piezas de HAC

Paralelamente a la ejecución de los bloques se fabricaron 90 probetas cilíndricas normalizadas de 150x300 mm, que posteriormente fueron ensayadas a compresión, según la norma UNE-EN 12390-3[1], a la misma edad que las probetas testigo (28 días). Los resultados de resistencia a compresión de las probetas cilíndricas y testigo están descritas en Rojas [2] y Rojas et al. [3].

3.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1.- Planteamiento del modelo de estimación y cálculo de los factores de corrección

Con el objeto de estimar la resistencia equivalente *in situ* a través de probetas testigo se ha desarrollado un procedimiento deductivo de algunos factores de corrección que valoran la influencia de las condiciones específicas de este estudio. Para ello se ha considerado un modelo de regresión lineal inicial Ec. (1) el cual ha sido transformado en otro modelo tipo cociente Ec. (2) con el objeto de conseguir la estabilización de la varianza de sus residuos. Las Ecs. (1) y (2) han sido resueltas por el método de mínimos cuadrados ordinarios.

$$\tilde{f}_{cil,insitu} = b_1 + b_2 f_{c,tes} + b_3 \phi^2 + b_4 HUM + b_5 DIR + b_6 f_{c,tes} \cdot \phi^2 + b_7 f_{c,tes} \cdot HUM + b_8 \phi^2 \cdot HUM \quad (1)$$

$$\frac{\tilde{f}_{c,tes}}{f_{cil,insitu}} = b_1 + b_2 f_{cil,insitu} + b_3 \phi^2 + b_4 HUM + b_5 DIR + b_6 f_{cil,insitu} \cdot \phi^2 + b_7 f_{cil,insitu} \cdot HUM + b_8 \phi^2 \cdot HUM. \quad (2)$$

Estimación de la resistencia in situ de HAC mediante la resistencia de testigos

donde

$\tilde{f}_{cil,insitu}$: Resistencia equivalente *in situ* pronosticada. Se ha considerado la resistencia obtenida en probeta cilíndrica de 150x300 mm la más próxima a la resistencia *in situ*, debido a que se ha fabricado y conservado bajo condiciones parecidas a la de los elementos de HAC.

$f_{c,tes}$: Resistencia a compresión de la probeta testigo.

ϕ^2 , *HUM* y *DIR*: Variables del ensayo. Diámetro, condiciones de humedad y dirección de extracción del testigo.

En el modelo de la Ec. 2 el *p*-valor de todas las variables explicativas fue significativo, a excepción de la variable *DIR* (dirección de extracción del testigo) que presentó un *p*-valor del 66,9%, muy superior al 5% adoptado. El fenómeno de la formación de burbujas de aire depositadas bajo el árido grueso generado en el proceso de exudación parece ser menor en el HAC que en el HVT. Una de las explicaciones para la disminución de dichas burbujas en el HAC es que éstos presentan una estructura más homogénea y compacta, junto con el bajo contenido de áridos gruesos y el menor tamaño máximo de éstos.

Así pues, el modelo finalmente considerado con sus parámetros estimados y con la eliminación de la variable *DIR* por su nulo grado de significación es el siguiente:

$$\frac{\tilde{f}_{c,tes}}{f_{cil,insitu}} = 1.329 - 0.006787 f_{cil,insitu} - 0.001759 \phi^2 - 0.2630 HUM + 3.169 \times 10^{-5} f_{cil,insitu} \cdot \phi^2 + 0.001521 f_{cil,insitu} \cdot HUM + 5.874 \times 10^{-4} \phi^2 \cdot HUM \quad (3)$$

El contraste de significación global mostró que el estadístico *F* del modelo de la **Ec. (3)** supera ampliamente al cuantil crítico de la distribución \mathcal{F} para $\alpha = 0.05$. Por lo tanto se acepta que el modelo transformado es estadísticamente significativo para explicar las variaciones de $f_{c,tes}/f_{cil,insitu}$. Además los *p*-valor de todas las variables explicativas fueron muy inferiores al 5%.

En la Figura 2 se muestran las rectas de regresión para todos los conjuntos considerados en función del nivel resistente, el diámetro y la condición de humedad obtenidas de la Ec. (3).

Ahora bien, a partir de las seis rectas de regresión de la Fig. 2 derivadas del modelo aditivo de la Ec.3 se establece un procedimiento deductivo para la obtención de los factores que corrigen el resultado de la resistencia del testigo, $f_{c,tes}$, con el objeto de pronosticar la resistencia equivalente *in situ*, $f_{cil,insitu}$.

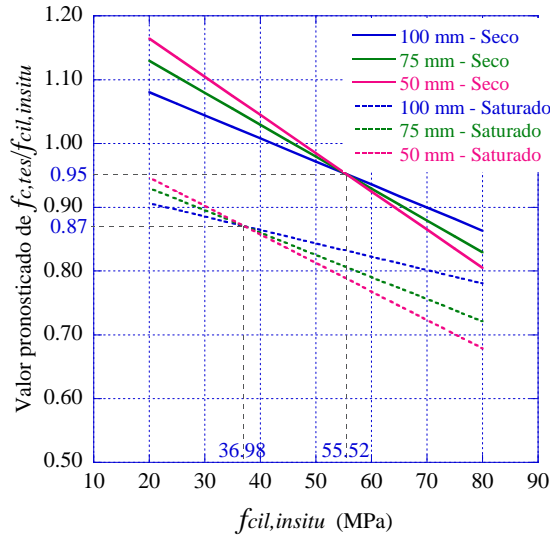


Figura 2. $\tilde{f}_{c,tes} / f_{cil,insitu}$ vs $f_{cil,insitu}$

El tipo de modelo multiplicativo que se pretende obtener es el descrito en la Ec. 4. Este modelo multiplicativo es similar al recomendado por la norma americana ACI-214.4R-10 [4] y adoptado por varios autores como Pérez [5], F. Cánovas [6] y Revuelta [7].

$$\tilde{f}_{cil,insitu} = F_{\phi} F_{HUM} F_{DIR} F_{BASIC} f_{c,tes} \quad (4)$$

Donde:

- $\tilde{f}_{cil,insitu}$: Resistencia equivalente *in situ* pronosticada (o estimada).¹
- F_{ϕ} : Factor de corrección para el diámetro del testigo.
- F_{HUM} : Factor de corrección para la condición de humedad del testigo.
- F_{DIR} : Factor de corrección para la dirección de extracción. $F_{DIR} = 1.0$. (Este valor es debido a que la variable *DIR* no fue significativa en el pronóstico de la resistencia equivalente *in situ*).
- F_{BASIC} ² : Factor de corrección básico, debido a particularidades inherentes a las probetas, tales como, microfisuración, efecto pared, condiciones de contorno, etc.

¹ Esta estimación es para estructuras en condiciones secas lo cual es habitual en la práctica. Si la estructura pudiese estar saturada o se requiere saber una resistencia de “referencia” en condiciones saturadas no sería de aplicación.

Estimación de la resistencia in situ de HAC mediante la resistencia de testigos

$f_{c,tes}$: Resistencia a compresión del testigo.

Para la deducción de los factores de corrección se ha tenido en consideración lo establecido por la norma europea UNE-EN 13791 [8] en relación con la equivalencia que existe entre la resistencia de un testigo con diámetro nominal entre 100 mm y 150 mm y relación longitud/diámetro igual a 2,0 y la resistencia de una probeta cilíndrica de 150x300 mm fabricada y curada bajo las mismas condiciones. En este sentido se ha elegido el testigo de 100x200 mm en condición seca como el “testigo de referencia”. Además, este tipo de testigo es el más comúnmente utilizado y al mismo tiempo recomendado por la normativa en general.

De esta manera el procedimiento para convertir el modelo aditivo de la Ec. (3) en el modelo multiplicativo de la Ec. (4) es el siguiente:

1. Se convierten las resistencias de los testigos de 50 mm y 75 mm en la resistencia del testigo de 100 mm para cada condición de humedad. De esta forma se obtienen los factores de corrección por influencia del diámetro del testigo, F_{ϕ} , es decir:

$$F_{\phi} = \frac{f_{c,tes(10,0)}}{f_{c,tes(\phi,0)}} \text{ o } F_{\phi} = \frac{f_{c,tes(10,1)}}{f_{c,tes(\phi,1)}} \text{ para } \phi = 50 \text{ y } 75 \text{ mm} . \quad (5)$$

2. La recta que representa al testigo de 100 mm en condición saturada se convierte en la recta correspondiente al testigo de 10 mm en condición seca. Es decir, que se obtienen los factores de corrección por influencia de la condición de humedad del testigo, F_{HUM} ,

$$F_{HUM} = \frac{f_{c,tes(10,0)}}{f_{c,tes(10,1)}} . \quad (6)$$

3. En esta parte del procedimiento, la resistencia del testigo está representada por el diámetro de 100 mm y en condición seca. Tal como se ha mencionado, el testigo de 100x200 mm en condición seca representa el “testigo de referencia”.
4. En el paso anterior, la variable explicada está dada por la relación $\tilde{f}_{c,tes(10,0)} / f_{cil,insitu}$, pero la que verdaderamente interesa ahora es su inversa, es decir, $\tilde{f}_{cil,insitu} / f_{c,tes(10,0)}$, en la que se intercambian los papeles de pronóstico y dato conocido, es decir, De esta manera, se estaría haciendo referencia al factor de corrección básico, F_{BASIC} . Este factor se expresa como en la Ec. (7).

$$F_{BASIC} = \frac{\tilde{f}_{cil,insitu}}{f_{c,tes(10,0)}} . \quad (7)$$

En las Tablas 2 y 3 se muestran los factores de corrección propuestos en función de la resistencia obtenida del testigo. Éstos son válidos tanto para HAC con poca o con gran cantidad de armadura, porque han sido obtenidos de una muestra que combinaba los

² La norma ACI-214.4R-10 hace referencia a este factor como F_d pero sólo valora el daño por la extracción del testigo.

resultados de ambas condiciones, una vez que se comprobó que no había diferencias significativas de estas en el resultado de la resistencia a compresión de las probetas testigo.

Tabla 2. Propuesta de factores de corrección para el diámetro del testigo, F_ϕ

$f_{c,tes}$ (MPa)*	F_ϕ para testigos secos		F_ϕ para testigos saturados	
	$f_{c,10}/f_{c,5}$	$f_{c,10}/f_{c,7.5}$	$f_{c,10}/f_{c,5}$	$f_{c,10}/f_{c,7.5}$
20-30	0.93	0.96	0.97	0.98
30-40	0.95	0.97	1.01	1.00
40-50	0.98	0.99	1.06	1.03
50-60	1.01	1.01	1.13	1.07
60-70	1.06	1.03	**	**

* Es la que se obtiene con testigos de 50 mm y de 75 mm.

** Fuera del rango de los resultados experimentales.

Tabla 3. Propuesta de factores de corrección para la condición de humedad del testigo, F_{HUM} y para las variables intrínsecas, F_{BASIC}

$f_{c,tes}$ (MPa)*	F_{HUM}	$f_{c,tes}$ (MPa)**	F_{BASIC}
20-30	1.19	20-40	0.92
30-40	1.17	40-60	1.00
40-50	1.14	60-70	1.09
50-60	1.12		

* Ya corregida a testigo de 100 mm y a condición saturada.

**Ya corregida a testigo de 100 mm y a condición seca.

Para el factor de corrección por diámetro F_ϕ (Tabla 2) no debe extrañar el hecho de no presentar rangos de resistencia de $f_{c,tes}$ entre 60-70 MPa para los testigos saturados y de 70-80 MPa para ambas condiciones de humedad. Tal como se observa en la Fig.2 a medida que el nivel resistente aumenta la ratio $f_{c,tes}/f_{cil,insitu}$ disminuye, por lo tanto es esperable que en las zonas de altas resistencias los testigos no superen el valor de $f_{cil,insitu}$. De aquí el hecho de no obtener resultados de $f_{c,tes}$ mayores a 70 MPa, para la condición seca.

Estimación de la resistencia in situ de HAC mediante la resistencia de testigos

Asimismo, para el factor de corrección por humedad F_{HUM} (Tabla 3) se observa la gran influencia que presenta el nivel resistente del hormigón en la ratio entre la resistencia de un testigo seco y la de un testigo húmedo. Este efecto podría estar relacionado con las diferencias de permeabilidad que existe entre los hormigones de resistencias bajas y de resistencias altas.

3.2.- Comparación de la ratio $f_{cil,in situ}/f_{c,tes}$ o del factor F_{BASIC} entre un HAC y un HVT

Con el propósito de comparar los factores de corrección F_{BASIC} obtenidos para el HAC con algunos propuestos para el HVT, se ha realizado un análisis estadístico a partir de una base de datos obtenida de otros investigadores [9-16] que estudiaron la relación $f_{cil,in situ}/f_{c,tes}$ en elementos fabricados en HVT cuyas especificaciones fueron similares a las del presente estudio.

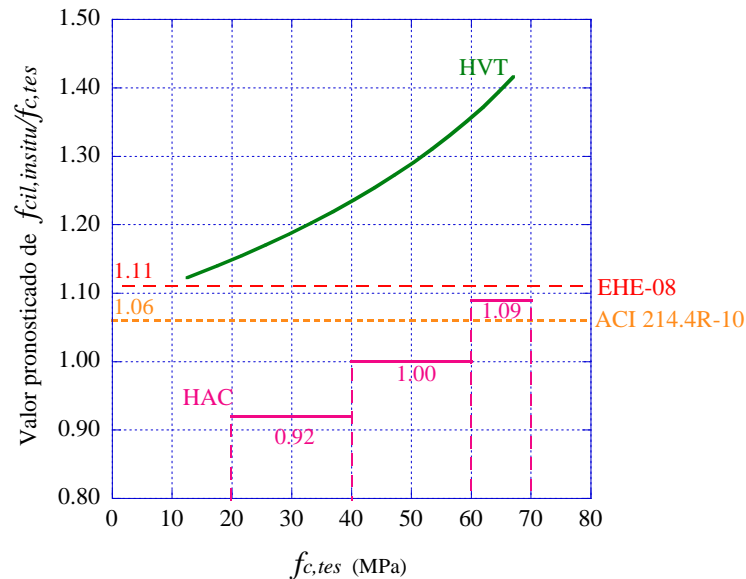


Figura 3. Factor de corrección F_{BASIC} entre HAC y HVT

En la Figura 3 se representa la línea de regresión obtenida de los estudios en el HVT mencionados anteriormente, así como las dos rectas que representan los valores constantes ofrecidos por la instrucción española EHE-08 [17] y la norma americana ACI 214.4R-10 [4] relacionado con el factor de corrección F_{BASIC} . Además, se muestran los valores de los factores de corrección F_{BASIC} obtenidos para el HAC mediante rectas escalonadas.

Es evidente que el comportamiento entre la resistencia equivalente *in situ* y la resistencia del testigo es diferente para los dos tipos de hormigones. En el caso del HAC estudiado no deben ser utilizados los factores de corrección F_{BASIC} propuestos

para el HVT debido a que se estaría dando un valor mayorado de la resistencia equivalente *in situ*.

En la Figura 3 también se observa que la línea de ajuste que representa al HVT se encuentra por encima de los valores recomendados por la instrucción EHE-08 [7] y la norma ACI 214.4R-10 [2], es decir, 1,11 y 1,06 respectivamente. En este sentido los valores ofrecidos por estas normas están del lado de la seguridad, aunque en mayor medida para los hormigones de altas resistencias.

3.- CONCLUSIONES

- Se han determinado algunos factores que corrigen el resultado de la resistencia del testigo para la predicción de la resistencia *in situ*. Estos factores de corrección están relacionados con las variables consideradas en este estudio (diámetro del testigo, dirección de extracción, condición de humedad del testigo y variables intrínsecas, tales como, microfisuración, efecto pared, condiciones de contorno, etc.).
- Se han encontrado diferencias en el cociente entre la resistencia equivalente *in situ* y la resistencia del testigo (lo que es equivalente a $F_{BASIC} = \tilde{f}_{cil,insitu} / f_{c,tes(10,0)}$) para los dos tipos de hormigones (HAC y HVT). Este cociente obtenido para el HAC, no es constante sino que varía con el nivel resistente del hormigón. En este sentido, el valor 1.11 descrito en la instrucción EHE-08 [15] y el valor 1,06 en la norma ACI 214.4R [2] para HVT no deberían ser utilizados en el HAC, debido a que se estaría sobrevalorando el pronóstico de la resistencia equivalente *in situ*.
- Las diferencias entre los dos tipos de hormigones podrían ser atribuidas fundamentalmente al grado de compactación del hormigón. En HVT las probetas cilíndricas, por lo general, han sido compactadas de manera diferente a los elementos de los que se extraen los testigos.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Laboratorio Central del Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC), al Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y a la empresa PRAINSA por el apoyo en la parte experimental de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, AENOR. UNE-EN 12390-3. - Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. Madrid, 2009.
- [2] ROJAS, L. - Ensayos de información y extracción de probetas testigo en hormigones autocompactantes. Tesis doctoral. E.T.S.I de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. 2012.

Estimación de la resistencia in situ de HAC mediante la resistencia de testigos

- [3] ROJAS, L., FERNÁNDEZ, J & LÓPEZ, J.C. - Rebound Hammer, Pulse Velocity, and Core Tests in Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal 109 (2) (Mar/Apr 2012), 235-243.
- [4] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 214.4R. - Guide for obtaining cores and interpreting compressive strength results, 2010.
- [5] PÉREZ, M. - Relación entre la resistencia a compresión de probetas-testigo y probetas normalizadas. Materiales de construcción, 1998. 48(249), 45-53.
- [6] F. CÁNOVAS, M. - Hormigón. Octava edición. Madrid, 2007. 666 p.
- [7] REVUELTA CRESPO, D., & GUTIÉRREZ JIMÉNEZ, J. P. - Ensayos de información complementaria del hormigón. Cemento hormigón, 2009. (935), 34-46.
- [8] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, AENOR. UNE-EN 13791. - Evaluación de la resistencia a compresión in-situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón. Madrid, 2009.
- [9] CAMPBELL R.H. & TOBIN R.E. - Core and cylinder strengths of natural and lightweight concrete. ACI Journal, Proceedings, 1967. 64(18), 191-195.
- [10] BLOEM, D. L. - Concrete strength in structures. ACI Journal, Proceedings, 1968. 65(3), 176-187.
- [11] LEWIS, R. K. - Effect of core diameter on the observed strength of concrete cores. Research report. N°50, CSIRO Division of building research, 1976. Melbourne.
- [12] HOSTALET, F. A. - La estimación in situ de la resistencia del hormigón endurecido. Tesis doctoral. E.T.S.I de caminos, canales y puertos. Universidad Politécnica de Cataluña., 1989. 662 p.
- [13] MAK, S.L. ATTARD M.M., HO D.W.S., DARVALL L. - In situ strength of high strength concrete. Report No. 4/90. Civil Engineering Research Report, 1990. 90 p.
- [14] ARIÓZ, O., TUNCAN M., RAMYAR K., TUNCAN A. - A comparative study on the interpretation of concrete core strength results. Magazine of Concrete Research, 2006. 58(2), 117-122.
- [15] YUAN, R.L., RAGAB M., HILL R.E., COOK J.E. - Evaluation of core strength in high-strength concrete. Concrete International, 1991. 13(5), 30.
- [16] NAIK, T. R., VIRAL M.P., LARRY E.B. - Performance of high-strength concrete incorporating mineral by-products. Research in Progress Seminar at the ACI National Convention, 1992. 15 (19).
- [17] COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. EHE-08. - Instrucción de hormigón estructural. Ministerio de Fomento. Madrid, 2008.