

ESTUDIO SOBRE LA RESISTENCIA Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

Jaime FERNANDEZ GOMEZ

DR. INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Catedrático de Edificación y Prefabricación de la ETSICCP, UPM, Madrid.

Presidente de INTEMAC.

jfernandez@intemac.es

Angel VILANOVA FERNANDEZ

DR. INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, VENEZUELA

Profesor Asociado

avilanov@ucla.edu.ve

Galit AGRANATI LANDSBERGER

DR. INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Pisos Mejorada s.a.

Directora técnica

agranati@gmail.es

RESUMEN

En este trabajo se ha creado una extensa base de datos que incluye las dosificaciones y los resultados experimentales de las características mecánicas del hormigón autocompactante (HAC), lo cual ha permitido analizar de forma generalizada la influencia de varias variables en la resistencia a compresión del HAC. Las variables analizadas incluyen la influencia del contenido y tipo de filler, la relación agua/cemento, y la influencia del contenido de áridos. También se ha evaluado la aplicabilidad de los modelos de las normativas para estimar las características mecánicas del HAC.

PALABRAS CLAVE: Hormigón autocompactante, resistencia a compresión, adiciones, base de datos, relación agua/cemento.

1. Introducción

La resistencia a compresión es la propiedad mecánica más importante para caracterizar el hormigón, y es el parámetro básico de entrada en todos los modelos de comportamiento mecánico y reológico. En temas relacionados con la durabilidad, frecuentemente se utiliza la resistencia a compresión como un indicador de la calidad del hormigón, debido a que esta característica está relacionada con la microestructura del materia y la relación agua/cemento. Los distintos modelos normativos de cálculo para estimar las propiedades mecánicas toman como referencia principal la resistencia a compresión del hormigón.

En el hormigón convencional (HC), el parámetro más importante que afecta a la resistencia a compresión es la relación agua/cemento, pero en el caso del hormigón autocompactante (HAC) la situación es más compleja. En comparación con el hormigón convencional, el HAC contiene mayor volumen de pasta, menor contenido de árido grueso y un elevado contenido de filler y aditivos. Estas variaciones en la mezcla modifican sus características en fresco, pero también sus características mecánicas. En el caso del HAC, hay otras variables a considerar en relación con la resistencia a compresión, como el tipo de filler y la relación agua/finos.

Además de estudiar la influencia de varios factores sobre la resistencia a compresión del HAC, también se evalúan los modelos normativos de cálculo de determinación del módulo de deformación en el hormigón convencional y su aplicabilidad al HAC. Los modelos considerados han sido el Eurocódigo 2 [1], la EHE-08 [2] y el ACI 318 [3]. Se ha realizado una comparación entre los valores experimentales y los estimados con los modelos, realizado un análisis estadístico de los resultados.

2. Base de datos y características de las mezclas

Para estudiar la resistencia a compresión de una manera generalizada y considerando las diferentes variables, se ha construido una base de datos que incluye dosificaciones y propiedades mecánicas del HAC. Se han utilizado 138 referencias publicadas, con un total de 627 dosificaciones para la resistencia a compresión, 193 dosificaciones para el módulo de deformación, 165 dosificaciones para la resistencia a tracción indirecta y 59 dosificaciones para la resistencia a flexotracción. La referencia [4] incluye información detallada sobre las referencias utilizadas, y sobre las dosificaciones y características mecánicas de todas las mezclas incluidas en la base de datos.

La **Tabla 1** incluye algunos datos sobre las dosificaciones de las mezclas. Se indican los valores mínimo, máximo y la media de las siguientes variables: contenido de cemento, relación agua/cemento, contenido de filler y relación agua/finos. También se han incluido datos sobre el escurrimiento de las mezclas. Las mezclas del HAC se caracterizan, en general, por un contenido menor de áridos y una mayor relación arena/contenido total de áridos.

	cemento, Kg/m ³	agua/ cemento	filler, Kg/m ³	agua/ finos	áridos Kg/m ³	arena/ áridos,	escurrimiento, mm
Mínimo	133	0,26	0	0,21	1050	0,36	457
máximo	665	1,34	490	0,80	4375	0,84	864
media	378	0,51	163	0,34	1660	0,52	700
Desviación estándar	96	0,16	96	0,07	313	0,08	65

Tabla 1. Datos sobre las dosificaciones de las mezclas.

La relación agua/cemento tiene un valor medio de 0,51, siendo la relación agua/finos bastante más baja, presentando un valor medio de 0,34. Esto se debe al alto contenido de finos de estas mezclas. Debido al mayor contenido de finos, el contenido de áridos disminuye y el contenido de pasta aumenta. El escurrimiento es la característica más utilizada para definir la condición de autocompactabilidad del HAC. Según el anexo 17 de la EHE, el escurrimiento del HAC puede variar entre 550 y 850mm.

Se pueden clasificar los tipos de filler en dos grupos: puzolánicos o inertes. Los fillers de origen puzolánico participan en el proceso de hidratación y contribuyen a la resistencia a compresión del hormigón. La ceniza volante es el filler puzolánico más utilizado en HAC, y su ventaja es que mejora las características reológicas de la mezcla y se puede utilizar como sustituto del cemento [5]. Otros tipos de fillers puzolánicos son la escoria y el humo de sílice. El segundo tipo de fillers son los fillers inertes, que son los filler que no participan en el proceso químico de la hidratación. La caliza finamente molida es el filler inerte más utilizado, y su función es mayoritariamente física, para mejorar el flujo y la cohesividad del HAC [6].

La **Tabla 2** incluye los tipos de filler más utilizados, y su contenido medio. Es interesante que el 11% de las mezclas no contengan ningún tipo de filler, y su contenido total de finos coincide con el de cemento.

	caliza	ceniza volante	escoria	humo de sílice	otros tipos	sin filler
% de mezclas con este tipo de filler	30.3%	38.8%	3.5%	2.9%	13%	11%
Contenido medio, kg/m ³	196	156	195	34	222	0

Tabla 2. Los tipos de filler más utilizados y su contenido medio.

3. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se considera la característica mecánica más importante del hormigón, y es el *parámetro básico de prácticamente todos los modelos de comportamiento*. La resistencia a compresión de las mezclas incluidas en esta base de datos varía entre 20 y 145 MPa, con un valor medio de 55 MPa. La **Figura 1** incluye la distribución de la resistencia a compresión en forma de histograma.

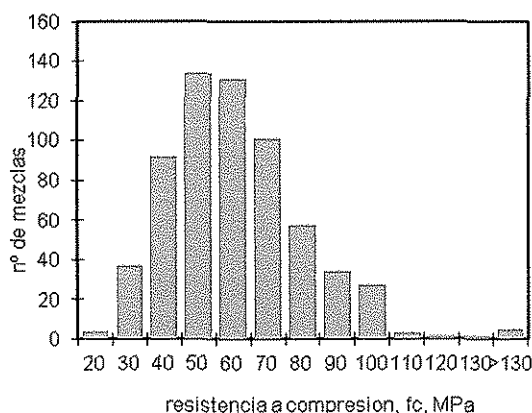


Figura 1. Histograma de la resistencia a compresión de las mezclas.

3.1. Relación entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión.

En el caso del hormigón convencional, la resistencia a compresión está principalmente relacionada con la relación agua/cemento. En el caso del HAC, para mezclas con relación agua/cemento similar, la resistencia es mayor que la del HC. Esto se debe a varios factores, tales

como la existencia de una microestructura más densa, la utilización de fillers puzolánicos, una baja relación agua/finos, y el poseer menor diámetro máximo del árido. En la Figura 2 se puede ver la relación entre la resistencia a compresión y la relación agua/cemento. También está incluida la curva de ajuste y el valor del coeficiente de correlación. Se observa una alta dispersión de los datos, debido principalmente a las distintas naturalezas de las dosificaciones de hormigón recopiladas. Esta alta dispersión muestra que se puede obtener HAC, dependiendo de su naturaleza, con resistencias a compresión que pueden oscilar entre 30 y 90 MPa, para una misma relación agua/cemento de 0,40.

La influencia de factores como el tipo de cemento y tipo de filler en la relación entre la resistencia y la relación agua/cemento se incluye en las Figuras 3 y 4.

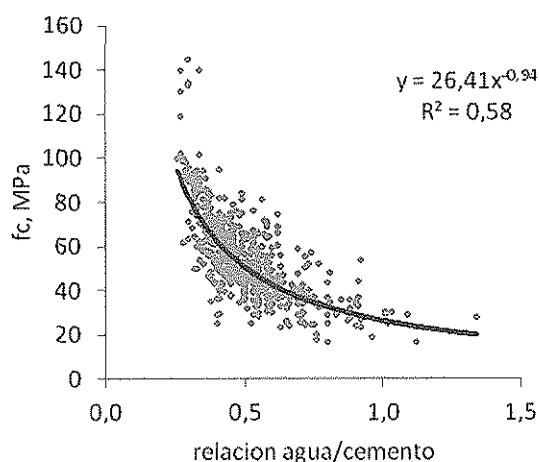


Figura 2. Relación entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión.

Otro factor que puede influir sobre la resistencia es el tipo de cemento empleado, pero en la Figura 3 se puede observar que la relación entre la relación agua/cemento y resistencia a compresión es similar entre las mezclas con cemento tipo I y tipo II, aunque para relaciones de agua/cemento más altas, la resistencia es ligeramente mayor en caso del cemento tipo I.

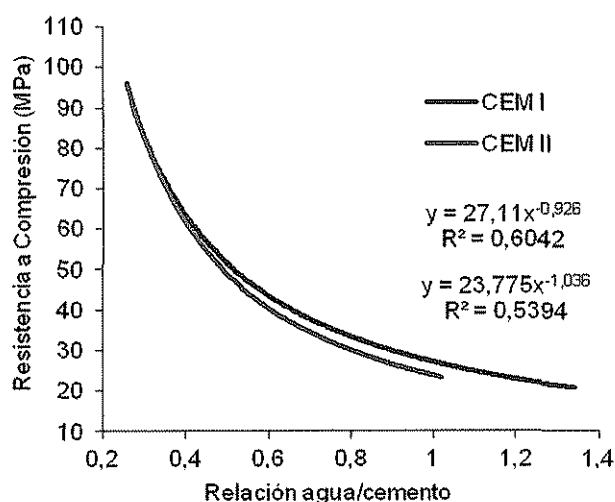


Figura 3 Relación entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión en función del tipo de cemento.

En la **Figura 4** se compara la relación entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión en función del tipo de filler utilizado. Las curvas se definen hasta sus límites de intervalo de validez. Se puede observar que para relación agua/cemento igual, la resistencia a compresión es mayor para las mezclas elaboradas con adiciones minerales con respecto a las que no poseen ningún tipo de adición en sus dosificaciones. El orden de resistencia a compresión, de mayor a menor, viene dado por los siguientes tipos de adiciones: humo de sílice, escoria, ceniza volante, filler calizo, y sin adiciones.

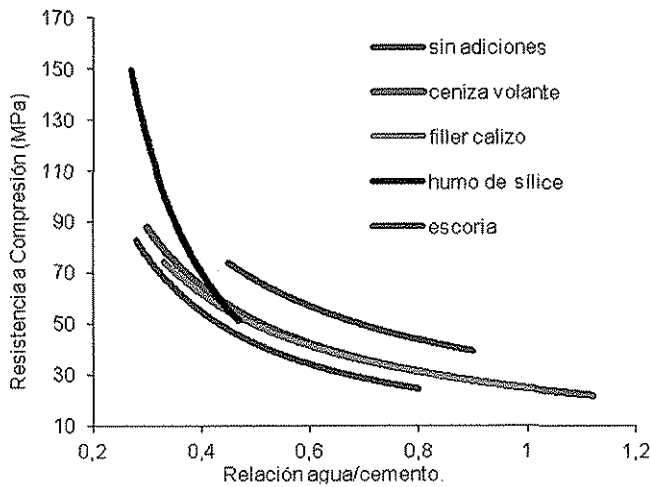


Figura 4. Relación entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión en función del tipo de filler.

3.2. Relación entre el árido y la resistencia a compresión

En general, el HAC se caracteriza por un contenido más bajo de áridos y una mayor relación arena/áridos, para mejorar su flujo. En las **Figuras 5 y 6** se evalúa el efecto de esta variable sobre la resistencia a compresión.

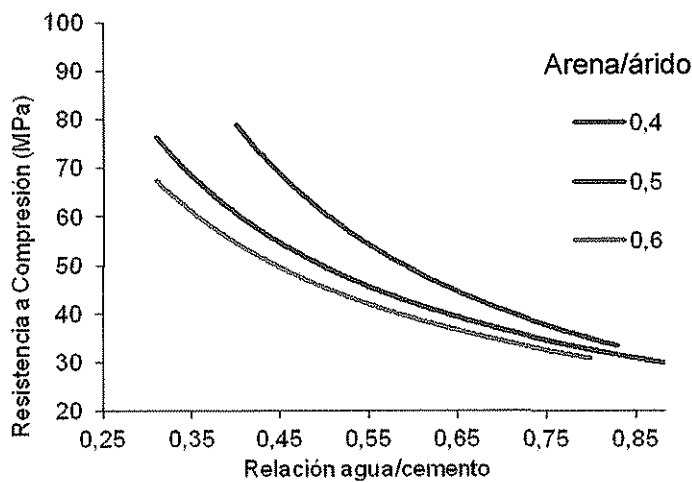


Figura 5. Relación entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión en función de la relación arena/ árido total.

En la Figura 5 se observa cómo a iguales relaciones agua/cemento, la resistencia a compresión aumenta al disminuir la relación de árido fino/árido total, siendo muy notables las diferencias en las resistencias a compresión entre la relación árido fino/árido total de 0,40 y de 0,50, especialmente a medida que disminuye la relación agua/cemento.

Considerando que el contenido total de áridos incluye arena y grava, si el contenido de arena disminuye, el contenido de grava aumenta. Un contenido mayor de grava produce en una mayor resistencia a compresión.

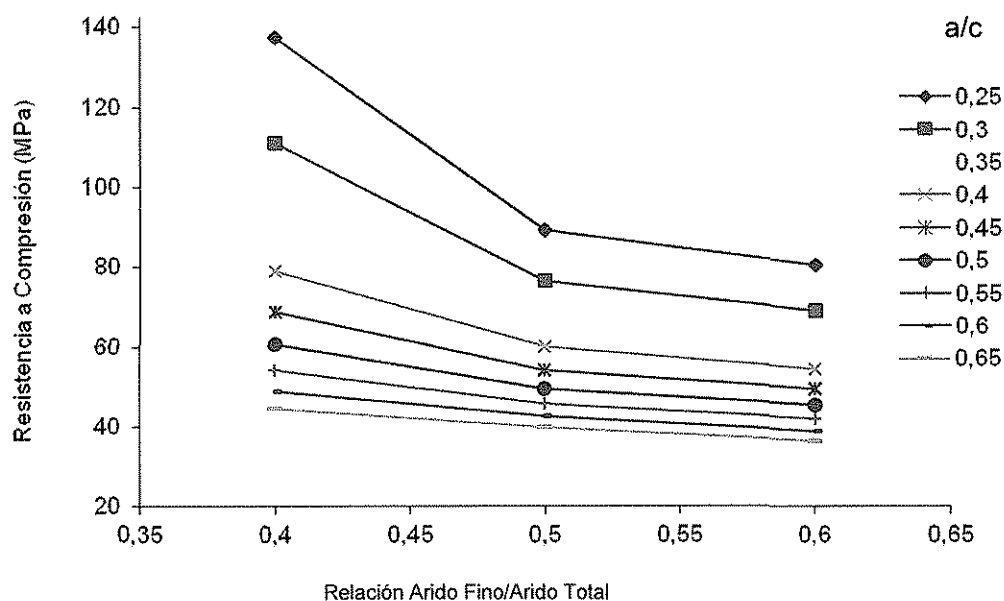


Figura 6. Relación entre la relación árido fino/total árido y la resistencia a compresión en función de la relación agua/cemento.

Se observa cómo independientemente de la relación agua/cemento escogida, la máxima resistencia a compresión se obtiene para una relación de árido fino/árido total de 0,40, disminuyendo a partir de ese valor y siendo prácticamente constante para valores superiores a 0,50.

3.3. La correlación de varias variables con la resistencia a compresión del HAC

En el tratamiento estadístico de datos, la correlación de variables indica la fuerza y la dirección de una relación entre dos variables aleatorias. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra.

En este caso se ha evaluado la correlación de las distintas variables que conforman las dosificaciones del HAC con la resistencia a compresión. Las variables consideradas son las cantidades de cemento, de agua, de finos, de adiciones, de arena, de grava, y las relaciones agua/cemento, agua/finos, el porcentaje de arena y el tamaño máximo del árido.

En la **Tabla 3**, que resume el estudio realizado, se puede ver que no hay una variable con una correlación significativamente alta con la resistencia a compresión, lo que indica que esta característica depende de muchos factores. La correlación más alta de la resistencia a compresión la presenta la relación agua/cemento, seguida por el contenido de cemento, la relación agua/finos y el contenido total de finos, con valores de -0,662, 0,659, -0,505, y 0,404, respectivamente. Esto explica la alta dispersión de los datos en la **Figura 2**. A la vista de que la variable relación agua / cemento contiene o está íntimamente ligada a la variable cantidad de cemento y a la relación agua/finos, el estudio de la resistencia a compresión se hizo, como era de suponer, a través de la relación agua/cemento.

	Cemento	Total Finos	adiciones	Agua	Arena	Grava	a/c	af	a/(a+g)	T. Max.
Coefficiente de Correlación De Pearson	,659	,404	-,274	-,252	-,103	,076	-,662	-,505	-,15	-,03

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson de la resistencia a compresión con respecto a los parámetros de dosificación.

4. Aplicabilidad de los modelos del EC-2, ACI 318 y EHE para estimar el módulo de deformación del HAC.

Como parte del estudio sobre la resistencia del HAC, también se ha tratado de establecer si los actuales modelos normativos de cálculo para estimar las distintas propiedades mecánicas del hormigón convencional pueden aplicarse para evaluar esas mismas propiedades mecánicas en el HAC. En esta comunicación se presentan únicamente los resultados correspondientes al módulo de deformación. En la referencia [4] puede verse un estudio más detallado y completo de todas las propiedades mecánicas.

La **Figura 7** incluye la relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión de todos los datos recopilados en la base de datos y la curva de ajuste correspondiente. También se han dibujado las curvas que representan los distintos modelos normativos de cálculo escogidos.

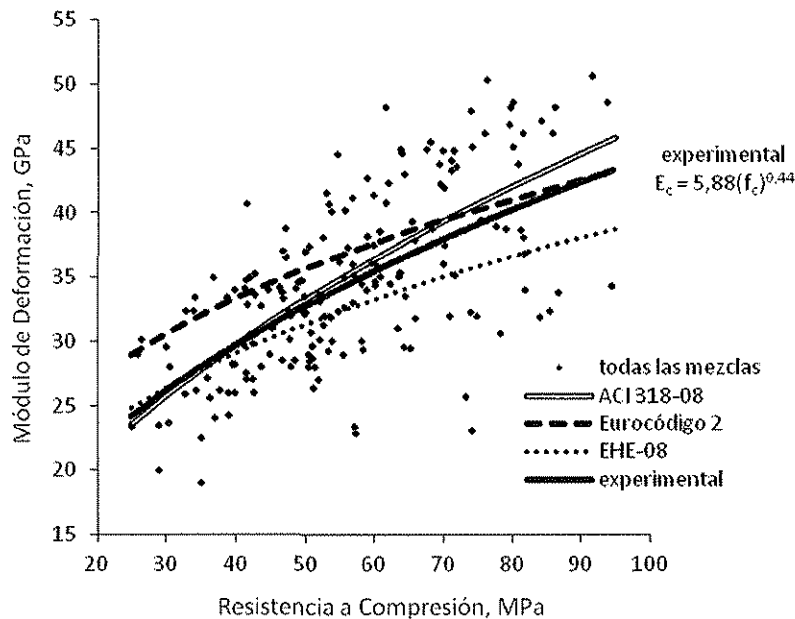


Figura. 7 Desarrollo del módulo de deformación en función de la resistencia a compresión de los distintos modelos normativos de cálculo y curva de regresión de los datos experimentales.

Se observa cómo la curva del modelo correspondiente al ACI 318-08 se ajusta muy bien a la línea de tendencia de los datos para valores de resistencia a compresión menores o iguales a 50 MPa. Sin embargo, para valores de resistencia a compresión superiores a 50 MPa, sobrestima los valores del módulo de deformación, por lo que a partir de ese punto las curvas divergen a medida que aumenta la resistencia a compresión.

En cuanto a la curva correspondiente al Eurocódigo 2, ésta sobrestima los valores del módulo de deformación para resistencias a compresión menores de 90 MPa, proporcionando en todo momento mayores valores.

En lo concerniente a la curva del modelo de la EHE-08, ésta se ajusta muy bien para valores de resistencia a compresión menores de 40 MPa. A partir de este punto, para valores mayores, la curva subestima los valores del módulo de deformación, incrementándose estas diferencias a medida que aumenta la resistencia a compresión del hormigón.

A continuación se va a analizar la precisión de los modelos normativos para estimar el valor del módulo de deformación en el HAC, mediante la comparación de los valores medidos (experimentales) y los valores calculados. Para llevar a cabo el análisis, se utiliza como referencia principal la relación de igualdad entre ambos valores (experimentales y calculados), representada en los gráficos por la recta $y=x$, e incluyendo un rango de desviación de $\pm 30\%$, como un rango razonable para juzgar la precisión de los modelos.

En este tipo de análisis, el modelo que mejor estima la propiedad mecánica estudiada es aquel que posee los datos más centrados con respecto a la recta de referencia ($y=x$) y dentro de los valores de los márgenes de desviación de $\pm 30\%$. Se considera que el modelo subestima si la mayoría de los datos se ubican por debajo de la recta de referencia, y que sobrestima si la mayoría de los datos se ubican por encima de la mencionada recta.

En la **Figura 8** se puede ver que el modelo que proporciona un mejor ajuste, al observar tanto las rectas de regresión generadas como sus correspondientes ecuaciones, es el correspondiente al ACI 318-08, pues es el que en líneas generales mejor adapta los datos a la recta de referencia, seguido del EC-2, y de la EHE-08.

En cuanto a la dispersión de datos de los tres modelos hay que señalar que, en todos los casos, los valores estimados por los modelos tienen menos variabilidad que los datos experimentales, lo cual indica que son poco discriminantes. Esto es más acusado en los modelos del EC-2 y de la EHE, y se debe a que todos ellos utilizan como parámetro de estimación la resistencia a compresión, y aunque están bien ajustados en valores medios, no contemplan otras variables, lo cual en el caso del HAC puede ser importante.

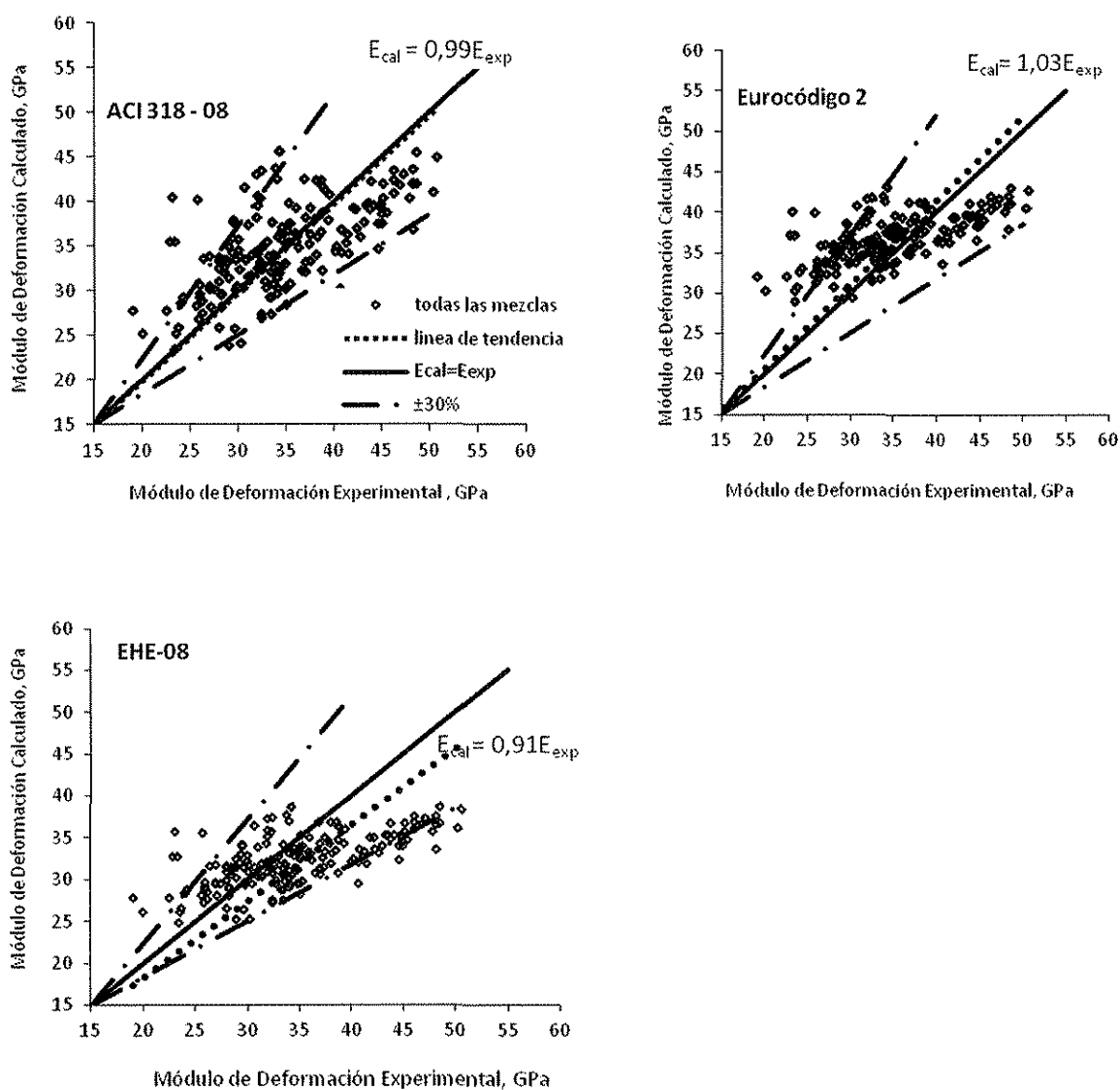


Figura 8. Módulo de deformación. Valores experimentales y valores calculados por los modelos normativos de cálculo escogidos.

5. Conclusiones

A la vista de los resultados expuestos pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- El empleo de los fillers utilizados para mejorar las características de autocompactabilidad incrementa la resistencia del hormigón para una misma relación agua/cemento.
- El humo de sílice y la escoria siderúrgica proporcionan los mayores incrementos de resistencia.
- Incluso con el empleo de las adiciones menos activas (ceniza volante y caliza) se obtiene valores medios de incremento de resistencia del orden de 10 MPa con respecto a la no adición.
- Las dosificaciones del HAC presentan mayor contenido de arena y mayor relación arena/árido total que las de HC. La resistencia a compresión se incrementa al disminuir esta última relación, para cualquier relación a/c, pero prácticamente estabilizándose por encima de 0,5.
- Los modelos de cálculo de las normas analizadas para la determinación del módulo de deformación del HC son también aplicables al HAC, siendo el del ACI 318 el que mejor ajuste presenta.
- Todos los modelos analizados para determinar el módulo de deformación están bien calibrados en valor medio, aunque los valores estimados tienen menor variabilidad que los valores experimentales, lo cual indica que son poco discriminantes.

6. Referencias

- [1] EN 1992-1-1, *Design of concrete structures*. European committee for standardization, 2004.
- [2] EHE-2008. *Instrucción Española de Hormigón Estructural*. Ministerio de Fomento, Madrid, España, 2008.
- [3] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 318. *Building code for structural concrete*. ACI 318-08. ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, EEUU, 2008.
- [4] VILANOVA, A. "Influencia de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante" Tesis Doctoral. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción. Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [5] BOUZOUBAA, N., LACHEMI, M.. "Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash", *Cement Concrete*, vol. 31, 2001, pp. 413-420.
- [6] POPPE, A.M., DE SCHUTTER, G.. "Effect of limestone filler on the cement hydration in SCC", *Proceedings of the Third International Symposium on self compacting concrete, RILEM Proceedings PRO 33*, 2003, pp. 558-566.