Evaluación de los modelos de predicción del ACI-08, Eurocódigo 2 y EHE-08, para estimar las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante

Evaluation of ACI-08, EC-2, and EHE-08 prediction models for estimating the mechanical properties of self compacting concrete

Á. Vilanova^(*), J. Fernández^(**), G. Agranati^(***)

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad estudiar la aplicabilidad de los modelos de cálculo del ACI-08, Eurocódigo 2 y de la EHE-08 utilizados para la estimar las propiedades mecánicas del hormigón convencional, en el hormigón autocompactante. Las propiedades mecánicas estudiadas han sido: el módulo de deformación, la resistencia a tracción y la resistencia a flexotracción. Para llevar a cabo la investigación fue necesario construir una extensa base de datos que permitiera albergar en ella una gran cantidad de dosificaciones de hormigón autocompactante y un amplio rango de valores de sus propiedades mecánicas para lograr una muestra lo más representativa posible. En primera instancia se comparó el comportamiento de cada uno de estos modelos normativos de cálculo, con la curva de regresión de los datos obtenidos para el hormigón autocompactante, observando su comportamiento y adaptabilidad a los distintos modelos normativos. Posteriormente se compararon los valores experimentales y los valores medidos para estudiar la aplicabilidad de estos modelos normativos de cálculo del hormigón convencional en el hormigón autocompactante.

SUMMARY

The objective of this study is to evaluate the applicability of the ACI-08, EC-2, and EHE-08 models for the estimating of the mechanical properties of self-compacting concrete (SCC). The mechanical properties considered are the modulus of elasticity, tensile strength, and modulus of rupture. In order to statistically evaluate the applicability of the models it was necessary to compile an extensive database that included the experimental results for the various mechanical properties analyzed and the exact dosifications of the mixtures. The first part of the study includes an analysis of each one of the models, together with a regression analysis in order to evaluate the behavior and the adaptability to the different models. The specific characterization parameters for each concrete mixture were used to calculate the various mechanical properties applying the different estimation models. The second part of the analysis consisted in comparing the experimental results with the estimated results for all the mixtures in order to evaluate the applicability of these models to SCC.

Palabras Clave: Hormigón autocompactante, modelos de estimación, módulo de elasticidad, resistencia a tracción, resistencia a flexotracción.

Keywords: Self compacting concrete, estimating models, modulus of elasticity, tensile strength, modulus of rupture.

^(*) Dr. Ingeniero Civil. Universidad de Barquisimeto

^(**) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Edificación y Prefabricación de la ET-SICCP. UPM, Madrid (España)

^(***) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dpto. de Ingeniería Civil de la ET-SICCP. UPM, Madrid (España)

Persona de contacto/Corresponding author: jfernandez@intemac.es (J. Fernández)

1. INTRODUCCIÓN

Comparado con el hormigón convencional, el hormigón autocompactante posee generalmente mayor volumen de adiciones, mayor contenido de superplastificante, menor contenido de árido grueso, menor tamaño máximo de árido y mayor contenido de pasta. Estas modificaciones en la composición de la mezcla influyen sobre el comportamiento del hormigón en su estado fresco, pero también en el estado endurecido y en sus propiedades mecánicas.

Se dice generalmente que las propiedades mecánicas del hormigón convencional y el hormigón autocompactante son muy similares. Sin embargo, todavía a día de hoy no existe unanimidad al respecto y aun es motivo de debate. En lo que a ello concierne, los investigadores todavía no son unánimes en sus conclusiones, especialmente a la hora de decir cual posee, para igual resistencia, mayor o menor módulo de deformación, resistencia a tracción o resistencia a flexotracción, tal como puede observarse en la tabla 1, donde se muestran de acuerdo a la propiedad mecánica estudiada, cómo distintos investigadores encuentran mayores, menores o iguales valores en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante con respecto a las del hormigón convencional.

Las diferencias en las propiedades mecánicas entre el hormigón convencional y el hormigón autocompactante pueden ser atribuidas a tres características principales presentes en este último hormigón: la modificación en las proporciones y características de las dosificaciones, la mejora de la microestructura y homogeneidad

del material y la no existencia de vibración durante la colocación del hormigón.

La modificación en las proporciones de la dosificación en el hormigón autocompactante incluye altos contenidos de pasta y de finos, bajas relaciones agua/cemento y agua/finos, bajo contenido de árido grueso, tamaños máximos de árido más pequeños y el uso de adiciones, agentes reductores de agua de alto rango (superfluidificantes) y agentes modificadores de viscosidad. La mejora en la microestructura viene dada por las características de la pasta y por la menor porosidad en la zona de transición de la interfase árido-pasta.

La baja relación agua/finos, necesaria para lograr la adecuada trabajabilidad, es la responsable, junto al uso de los reductores de agua de alto rango, de la mejora de la microestructura del hormigón. Por último, la ausencia de vibración durante la colocación del hormigón autocompactante, hace que se eliminen los defectos propios de tal actividad, tales como la posibilidad de segregación de la mezcla.

Por otro lado, las normas de cálculo no han incluido todavía fórmulas especiales para determinar las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante, por lo que parece necesario comprobar si los modelos actuales pueden ser aplicados al mismo.

2. SIGNIFICANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación trata de establecer si los actuales modelos normativos de cálculo para estimar las distintas propieda-

Tabla 1

Conclusiones de algunos investigadores sobre las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante con respecto al hormigón convencional

Propiedades Mecánicas del Hormigón Autocompactante								
Módulo de Deformación			Resistencia a Tracción			Resistencia a Flexotracción		
Investigadores	Igual Ec (*)	Menor Ec (*)	Investigadores	Igual fct(**)	Mayor fct(**)	Investigadores	Igual fct,fct(***)	Mayor fct,fct(***)
Attiogbe et al., (1)	x		Ouchi, et al. (11)	X		Horst y Dusseldorf (2)	x	
Horst y Dusseldorf (2)	x		Tviksta (3)	X		Mata (7)	x	
Tviksta (3)	x		Domone (10)	X		Leeman y Hoffmann (19)	x	
Persson (4)	x		EFNARC (12)	X		Turcry, et al. (20)		x
Poon y Ho (5)	x		Roziere, et al. (13)	X		Koehler y Fowler (6)		x
Koehler y Fowler (6)		x	Brouwers y Radix (14)		x	Klug y Holschemacher (16)		x
Mata (7)		x	Martí et al. (15)		x	Griffin et al. (21)		x
Turcry et al. (8)		x	Klug y Holschemacher (16)		x	Horta (22)		x
Holschemacher y Klug (9)		x	Coppola et al. (17)		x	Cervantes y Roesler (23)		x
Domone (10)		x	Sagoe, et al. (18)		x	Gurjar (24)		x

(*) Módulo de elasticidad.
 (**) Resistencia a tracción.
 (***) Resistencia a flexotracción.

des mecánicas del hormigón convencional, pueden aplicarse para evaluar esas mismas propiedades mecánicas en el hormigón autocompactante. Las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante estudiadas son las siguientes: el módulo de deformación, la resistencia a tracción y la resistencia a flexotracción. Para ello, y a través de la construcción de una extensa base de datos producto de la recopilación de gran cantidad de dosificaciones de hormigón autocompactante y de un amplio rango de valores de sus propiedades mecánicas procedentes de diversos documentos técnicos publicados hasta la fecha, se compararán los valores experimentales y los valores medidos para estudiar la aplicabilidad de estos modelos normativos

de cálculo del hormigón convencional en el hormigón autocompactante (25).

3. BASE DE DATOS

La base de datos sobre las características de las dosificaciones y las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante, fue construida a través de la consulta de 138 referencias publicadas a la fecha. Estas referencias estaban compuestas por artículos publicados en revistas científicas, publicaciones de centros de investigación universitarios, técnicos y científicos, publicaciones de conferencias, congresos, simposios, tesis doctorales y de maestría, entre otras, tal como se muestra en la tabla 2. En total se lograron recopilar un

Tabla 2

Resumen de la base de datos en función de las características mecánicas estudiadas en el hormigón autocompactante y de las distintas fuentes consultadas

Fuentes (*)	N.º Ref.	Resistencia a Compresión		Módulo de Deformación		Resistencia a Tracción		Resistencia a Flexotracción	
		N.º de Datos	%	N.º de Datos	%	N.º de Datos	%	N.º de Datos	%
Publicaciones Revistas Científicas:									
ACI Materials Journal	3	31	4,94	21	10,88	2	1,21	2	3,39
ACI Structural Journal	2	3	0,48	2	1,04	2	1,21	0	0,00
Archives of Civil and Mechanical Engineering	1	3	0,48	3	1,55	3	1,82	0	0,00
Boletín de la Soc. Española de Cerámica y Vidrio	1	2	0,32	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Building and Environment	3	7	1,12	5	2,59	6	3,64	0	0,00
Canadian Journal of Civil Engineering	1	4	0,64	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Cement & Concrete Composites	4	14	2,23	10	5,18	10	6,06	0	0,00
Cement & Concrete Research	26	124	19,78	13	6,74	14	8,48	3	5,08
Cemento y Hormigón	1	15	2,39	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Ciencia e Tec. de Materiais de Construção Civil	1	1	0,16	1	0,52	1	0,61	0	0,00
Construction and Building Materials	10	46	7,34	10	5,18	22	13,33	1	1,69
Int. Jour. of Computer Inf. Sys. Scien. and Eng.	1	2	0,32	2	1,04	0	0,00	2	3,39
International Journal of Nuclear Power	1	1	0,16	0	0,00	1	0,61	1	1,69
Journal of Civil Engineering and Management	1	2	0,32	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Journal of Materials in Civil Engineering	5	8	1,28	5	2,59	7	4,24	1	1,69
Journal of Technical-On Line Selcuk Universitesi	1	4	0,64	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Magazine of Concrete Research	3	14	2,23	14	7,25	0	0,00	9	15,25
Materiales de Construcción	2	12	1,91	0	0,00	11	6,67	0	0,00
Materials and Structures	1	3	0,48	3	1,55	3	1,82	0	0,00
Otto-Graf-Journal	2	11	1,75	9	4,66	4	2,42	0	0,00
Resources Conservation & Recycling.	1	11	1,75	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Science and Engineering Journal of Firat Univ	1	4	0,64	0	0,00	4	2,42	0	0,00
Structures & Buildings	1	1	0,16	0	0,00	0	0,00	0	0,00
The Arabian Journal for Science and Engineering	1	1	0,16	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Publicaciones de Centros de Investigación									
Universitarios, Técnicos y Científicos	26	107	17,07	39	20,21	23	13,94	24	40,68
Publicaciones de Conferencias, Congresos, Simposios	13	39	6,22	8	4,15	3	1,82	0	0,00
Tesis Doctorales y Tesis de Maestría	11	55	8,77	22	11,40	24	14,55	14	23,73
Otras Publicaciones	14	102	16,27	26	13,47	25	15,15	2	3,39
Totales:	138	627	100,00	193	100,00	165	100,00	59	100,00

(*) Los detalles de las fuentes bibliográficas están incluidos en (25).

1. Distribución de frecuencias de algunos de los parámetros más relevantes de las dosificaciones y de las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante recopiladas en la base de datos.

1

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. Por otro lado, en la figura 1 se observan las distribuciones de frecuencia de algunos de los parámetros más relevantes de las dosificaciones de hormigón autocompactantes recabadas en la base de datos.

4. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NORMATIVOS DE CÁLCULO ESCOGIDOS

Los diferentes modelos normativos de cálculo escogidos para medir las distintas propieda-

des mecánicas a estudiar son los siguientes: el ACI-08 (26),(27) el Eurocódigo 2 (28) y la EHE-08 (29). En la Tabla 3 se presentan las distintas ecuaciones de cálculo propuestas por las distintas normativas.

Los modelos que utiliza la EHE-08 tanto para la resistencia a tracción como para la resistencia a flexotracción son iguales a los propuestos por el Eurocódigo 2.

Es conveniente aclarar que el modelo de cálculo de la resistencia a tracción indirecta del Eurocódigo 2 difiere del propuesto por la normativa originalmente, debido a que fue necesario realizar algunos ajustes. La ecuación del modelo de cálculo original está

Tabla 3
Ecuaciones de cálculo de las distintas normativas

Propiedades Mecánicas	Normativa	Modelo de Cálculo	Unidades
Módulo de Deformación	ACI 318-08	$E_c = 4.700 \cdot \sqrt{f'_c}$	f'_c : (MPa) E_c : (MPa)
	Eurocódigo 2	$E_c = 22 \cdot [(f_{cm}) / 10]^{0.30}$	f_{cm} : (MPa) E_c : (GPa)
	EHE-08	$E_c = 8,5 (f_{cm})^{1/3}$	f'_c : (MPa) E_c : (GPa)
Resistencia a Tracción Indirecta	ACI 363R-08	$f_{ct,sp} = 0,59 (f_{cm})^{1/2}$	f_{cm} : (MPa) $f_{ct,sp}$: (MPa)
	Eurocódigo 2	$f_{ct,sp} = 1/3 (f_{cm} - 8MPa)^{2/3}$	f_{cm} : (MPa) $f_{ct,sp}$: (MPa)
Resistencia a Flexotracción	ACI 363R-08	$f_{ct,fl} = 0,94 (f_{cm})^{1/2}$	f_{cm} : (MPa) $f_{ct,fl}$: (MPa)
	Eurocódigo 2	$f_{ct,fl} = 0,435 (f_{cm} - 8MPa)^{2/3}$	f_{cm} : (MPa) $f_{ct,fl}$: (MPa)

Donde:

E_c : Módulo de deformación del hormigón a la edad de 28 días

f'_c : Resistencia específica del hormigón a la edad de 28 días

f_{cm} : Resistencia media a compresión del hormigón a la edad de 28 días

$f_{ct,sp}$: Resistencia a tracción indirecta del hormigón a la edad de 28 días

$f_{ct,fl}$: Resistencia a flexotracción del hormigón a la edad de 28 días

$f_{ct,fl}$: Resistencia a flexotracción del hormigón a la edad de 28 días (Eurocódigo 2)

hecha para la resistencia a tracción directa y en función de la resistencia característica del hormigón (f_{ck}). Por lo tanto fue necesario transformar en primer lugar la resistencia característica en resistencia a compresión media a los 28 días, mediante la siguiente expresión [1]:

$$f_{ck} = f_{cm} - 8MPa \quad [1]$$

Y posteriormente considerar la resistencia a tracción directa como el 90% de la resistencia a tracción indirecta.

En el caso específico de la resistencia a flexotracción el modelo que propone el Eurocódigo 2, viene dado en principio en función de la resistencia a tracción media y de la altura del elemento viga del ensayo. En vista de ello, nuevamente fue necesario llevar a cabo algunos ajustes a la ecuación inicial propuesta por la normativa. Se convirtió la resistencia tracción media en la resistencia a compresión media a los 28 días a través de la siguiente expresión [2]:

$$f_{cm} = 0,30 (f_{cm} - 8MPa)^{2/3} \quad [2]$$

Posteriormente se sustituyó en la ecuación original y se tomó 150 mm como altura de la probeta de ensayo.

5. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON LOS MODELOS NORMATIVOS DE CÁLCULO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL

A) Módulo de deformación

En la figura 2 se observa de forma general, el módulo de deformación en función de la

2. Desarrollo del módulo de deformación en función de la resistencia a compresión de los distintos modelos normativos de cálculo escogidos y curva de regresión de los datos del hormigón autocompactante.

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. Se observa cómo la curva del modelo correspondiente al ACI 318-08 se ajusta muy bien a la línea de tendencia de los datos correspondiente al hormigón autocompactante 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 de los hormigones autocompactantes, por lo que a partir de ese punto, las curvas divergen a medida que aumenta la resistencia a compresión.

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

3. Valores relativos del módulo de deformación de los modelos normativos con respecto a la ecuación de regresión de los datos del hormigón autocompactante en función de la resistencia a compresión.

4. Desarrollo de la resistencia a tracción en función de la resistencia a compresión de los modelos normativos de cálculo escogidos y curva de regresión de los datos del hormigón autocompactante.

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

Por otro lado, en la figura 3, se observa en función de la resistencia a compresión los valores relativos del módulo de deformación de los distintos modelos normativos de cálculo escogidos, con respecto a la ecuación de regresión de los datos del módulo de deformación pertenecientes al hormigón autocompactante.

Se aprecia claramente que el Eurocódigo 2 sobrestima el valor del módulo de deformación prácticamente en todo el rango de resistencias. La norma ACI 318-08 presenta un mejor ajuste.

B) Resistencia a tracción

En la figura 4 se observa el desarrollo de la resistencia a tracción en función de la resistencia a compresión de todos los datos recopilados en la base de datos y su ajuste con respecto a los distintos modelos normativos de cálculo elegidos de la resistencia a tracción en el hormigón convencional. Se observa cómo el modelo normativo perteneciente al ACI 363R-08 para resistencias a compresión menores de 50 MPa sobrestima un poco la resistencia a tracción de los hormigones autocompactantes. Sin embargo, a partir de este punto la curva del modelo se desarrolla por debajo de la línea de tendencia de los datos pertenecientes al hormigón autocompactante, subestimándolos, observándose que a medida que aumenta la resistencia a compresión las diferencias entre ellas se incrementan ya que ambas curvas divergen.

Por otro lado, la curva del modelo correspondiente al Eurocódigo 2 para resistencias a

compresión menores de 60 MPa se desarrolla ligeramente por debajo de los valores correspondientes al hormigón autocompactante, subestimando con ello sus valores. Para resistencias a compresión muy altas (>60 MPa), el modelo normativo del Eurocódigo 2 adopta un comportamiento similar al del hormigón autocompactante. En cualquier caso, la coincidencia de la curva experimental es muy apreciable.

Por otro lado, en la figura 5, se observa en función de la resistencia a compresión los valores relativos de la resistencia a tracción de los distintos modelos normativos de cálculo escogidos, con respecto a la ecuación de regresión de los datos de la resistencia a tracción pertenecientes al hormigón autocompactante. El modelo del Eurocódigo 2 parece tener una precisión muy buena para resistencias a compresión superiores a los 40 MPa.

C) Resistencia a flexotracción

En la figura 6 se observa el desarrollo de la resistencia a flexotracción en función de la resistencia a compresión de todos los datos recopilados en la base de datos y su ajuste con respecto a los modelos normativos de cálculo escogidos de la resistencia a flexotracción del hormigón convencional. En él, se observa cómo la curva del modelo correspondiente al ACI 363R-08, para resistencias a compresión menores de 70 MPa, sobrestima los valores de la resistencia a flexotracción de los hormigones autocompactantes, sin embargo a partir de ese punto, los subestima ligeramente.

En lo concerniente al modelo normativo del Eurocódigo 2, éste subestima en todo momento los valores de la resistencia a flexotracción de los hormigones autocompactantes. Siendo más notorio esto para resistencias a compresión menores de 40 MPa. Por otro lado, en la figura 7, se observa en función de la resistencia a compresión los valores relativos de

3

4

5

6

la resistencia a flexotracción de los distintos modelos normativos de cálculo escogidos, con respecto a la ecuación de regresión de los datos de la resistencia a flexotracción pertenecientes al hormigón autocompactante. Los modelos presentan diferencias notables entre sí y, a su vez, con los valores experimentales. Por un lado, mientras el modelo del ACI 363R-08 tiende a sobrestimar los valores de la resistencia a flexotracción del hormigón autocompactante, el modelo del Eurocódigo 2 tiende a lo contrario, a subestimar los valores. Este último modelo parece tener una diferencia casi constante con los valores experimentales, que podría tener su origen en la corrección de la "h" (altura del elemento viga del ensayo), incluida en la ecuación original propuesta por la normativa.

6. ANÁLISIS DE LOS MODELOS NORMATIVOS. COMPARACIÓN ENTRE VALORES MEDIDOS Y CALCULADOS

A continuación se van a analizar los modelos normativos propuestos para medir las diferentes propiedades mecánicas en el hormigón convencional en el hormigón autocompactante 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 valorar 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 mas 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 los sobrestima si la mayoría de los datos se ubican por encima.

También se han determinado las rectas de regresión entre valores experimentales y valores calculados en dos situaciones: con término independiente y sin él. Esta última recoge la tendencia general del modelo en todo el rango analizado, mientras que la anterior ofrece una idea de la capacidad discriminante del modelo y en que rangos de resistencia sobrestima o subestima el valor calculado.

A) Módulo de deformación

En la figura 8 (pág. siguiente), se muestran las relaciones entre los módulos de deformación medidos (experimentales) y los calculados con los diferentes modelos normativos considerados.

Al evaluar la figura 8 se observan algunas diferencias entre los modelos normativos para estimar el módulo de deformación del hormigón autocompactante, lo cual puede ser apreciado al observar el comportamiento y desarrollo de las rectas de regresión encontradas al abarcar sólo el intervalo de los datos (recta de regresión con término independiente) y sus respectivas pendientes. De acuerdo a ello, se encuentra una mayor pendiente en el modelo correspondiente al ACI 318-08, discriminado algo mejor la relación de variables entre los

7

8

8. Módulo de deformación. Valores experimentales vs valores calculados de los modelos normativos de cálculo escogidos.

9. Módulo de deformación. Valores experimentales en función de los residuos.

valores experimentales y los calculados. Por otro lado, si se observan detenidamente en los diferentes modelos normativos evaluados, las rectas de regresión de los datos que se hacen pasar por cero (recta de regresión sin termino independiente), podría decirse de acuerdo a ello, que el modelo que mejor ajusta, al observar tanto la rectas de regresión generadas como sus correspondiente 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 Eurocódigo 2, y de la EHE-08.

Sin embargo, de cara a valorar los modelos, es conveniente realizar un análisis un poco más exhaustivo y estudiar otras alternativas, tales como las diferencias de las medias entre los valores experimentales y los calculados, así como un análisis de residuos, evaluando entre otras cosas las diferencias entre ellos con respecto a los datos experimentales, tal y como puede apreciarse en la figura 9, así como observar las principales características de estas diferencias, tales como las sumatorias de las diferencias positivas y negativas, su número y respectivo porcentaje, etc. En la tabla 4 se recogen estas características principales del análisis de residuos, así como otros parámetros estadísticos.

En la figura 9 y en la tabla 4 puede observarse que el orden de mayor a menor en el porcentaje de diferencias positivas entre los calculados y medidos viene dado de la siguiente manera: el Eurocódigo 2, el ACI 318-08 y por último la EHE-08. Lógicamente el orden inverso para los porcentajes de las diferencias negativas.

Por otro lado, al observar los porcentajes que representan tanto las diferencias positivas como las negativas, se puede apreciar cómo para el caso del ACI 318-08 el intervalo entre ellas es el más reducido de todos (56%-44%), lo cual hace que dicho modelo normativo ajuste mejor y sea el más apropiado para evaluar el módulo de deformación en el hormigón autocompactante, seguido del modelo de la EHE-08 (35%-65%) y del Eurocódigo 2 (66%-34%). En la tabla 4 se muestra también una evaluación de los modelos, tanto en valores medios como en distribución de los datos, representada por los residuos. Para su evaluación se han numerado del 1 al 3 entre paréntesis, el grado de ajuste, otorgándole el 1 el mayor ajuste y el 4 el menor ajuste.

Cabe señalar que en esta ocasión el orden de ajuste, tanto para las diferencias de las medias como por el análisis de los residuos, es el mismo para ambos, por lo que puede decirse que en este caso el modelo normativo perteneciente al ACI 318-08 es el que mejor se adapta para evaluar el módulo de deformación en el hormigón autocompactante.

B) Resistencia a tracción

En la figura 10 se muestran, las relaciones entre los valores de la resistencia a tracción experimentales y los calculados de los dos modelos normativos elegidos.

Si se observan detenidamente en la figura 10 las rectas de regresión de los datos que se hacen pasar por cero de los modelos normativos evaluados, puede decirse que el modelo que mejor ajusta, al observar tanto la recta de re-

9

Tabla 4

Módulo de deformación. Parámetros estadísticos de los valores experimentales y de los distintos modelos normativos

	Módulo de Deformación (GPa)			
	Experimental	Calculado		
		ACI 318-08	Eurocódigo 2	EHE-08
Mínimo (Gpa)	19,00	23,50	28,96	24,85
Máximo (Gpa)	50,64	45,70	43,16	38,72
Media (Gpa)	34,57	34,94	36,66	32,31
Desviación estándar (GPa)	6,73	4,93	3,12	3,05
Coefficiente de Variación	0,19	0,14	0,09	0,09
Diferencia entre Calculados y Medidos		0,37	2,09	-2,26
Análisis de Residuos	$\Sigma +$	426,42	639,31	218,72
	n +	105,00	125,00	65,00
	%	56%	66%	35%
	$\Sigma +/n+$	4,06	5,11	3,36
	$\Sigma -$	-355,65	-246,71	-643,62
	n-	83,00	63,00	123,00
	%	44%	34%	65%
	$\Sigma -/n-$	-4,28	-3,92	-5,23
	media ("Σ+"+"Σ-")/n	4,16	4,71	4,59

10. Resistencia a tracción. Valores experimentales vs valores calculados de los modelos normativos de cálculo escogidos.

11. Resistencia a tracción. Valores experimentales en función de los residuos.

10

gresión generada como sus correspondientes ecuaciones, es el del ACI 363R-08 pues es el que, en líneas generales, mejor adapta los datos a la recta de referencia.

Por otro lado, también en la figura 10 se observan nuevamente algunas diferencias entre los dos modelos normativos para estimar la resistencia a tracción, lo cual se desprende al observar el comportamiento y desarrollo de las rectas de regresión encontradas y sus respectivas pendientes. De acuerdo a ello, se encuentra una mayor pendiente en el modelo correspondiente al del Eurocódigo 2, discriminado así algo mejor la relación de variables entre los valores experimentales y los calculados.

Sin embargo, nuevamente es conveniente realizar un análisis un poco más exhaustivo y

estudiar otras alternativas, tal y como se hizo en el caso del módulo de deformación. Por lo tanto, en la figura 11 se observa la relación existente entre los valores experimentales y las diferencias entre los valores calculados y experimentales para los dos modelos norma-

11

Tabla 5

Resistencia a tracción. Parámetros estadísticos de los valores experimentales y de los distintos modelos normativos evaluados

	Resistencia a Tracción (MPa)		
	Experimental	Calculado	
		ACI 363R-08	Eurocódigo 2
Mínimo (Mpa)	2,04	2,85	2,05
Máximo (Mpa)	7,60	5,63	6,34
Media (Mpa)	4,24	4,18	4,05
Desviación estándar (MPa)	1,16	0,54	0,84
Coeficiente de Variación	0,27	0,13	0,21
Diferencia entre Calculados y Medidos		-0,06	-0,19
Análisis de Residuos	$\Sigma +$	48,56	35,04
	n+	87,00	73,00
	%	54%	45%
	$\Sigma +/n+$	0,56	0,48
	$\Sigma -$	-58,28	-65,58
	n-	75,00	89,00
	%	46%	55%
	$\Sigma -/n-$	-0,78	-0,74
	media ($" \Sigma + " + " \Sigma - ") / n$	0,66	0,62

tivos considerados y en la tabla 5, las características principales del análisis de residuos así como de otros parámetros estadísticos.

En la figura 11 y en la tabla 5 puede observarse, que para el modelo normativo del ACI 363R-08 existe un mayor número de diferencias positivas entre los calculados y los medidos que en el caso del Eurocódigo 2. Por otro lado, al observar los porcentajes que representan tanto las diferencias positivas como las negativas, se puede apreciar cómo para el caso del ACI 363R-08 el intervalo entre ellas es algo más reducido (54%-46%), que en el caso del modelo normativo del Eurocódigo 2 es (45-55%).

Con respecto a la evaluación de los modelos, de acuerdo al criterio de las diferencias de las medias entre los valores calculados y los valores medidos, el que mejor ajusta es el modelo perteneciente al ACI 363R-08, mientras que según el criterio del análisis de los residuos, el modelo que mejor se adapta es el correspondiente al del Eurocódigo 2. Sin embargo, ambos criterios y ajustes indican que los dos modelos normativos en general, predicen muy bien los valores de la resistencia a tracción del hormigón autocompactante.

C) Resistencia a flexotracción

En la figura 12 se muestran, las relaciones entre los valores de la resistencia a flexotracción experimentales y los calculados con los diferentes modelos normativos elegidos.

Si se observan detenidamente los diferentes modelos normativos evaluados, las rectas de regresión de los datos que se hacen pasar por cero, podría decirse, de acuerdo a ello, que el modelo que mejor ajusta, al observar tanto la recta de regresión generada como sus correspondientes ecuaciones, es el perteneciente al del ACI 363R-08, siendo el ajuste casi exacto con la recta de referencia $y=x$, tal como puede observarse en el gráfico correspondiente al ACI 318-08 en la figura 12, siendo el orden de ajuste del Eurocódigo 2, bastante menor.

Por otro lado, en la figura 12 se observan también importantes diferencias entre los dos modelos normativos para estimar la resistencia a tracción. En esta ocasión mucho más marcadas que en los casos del módulo de deformación y de la resistencia a tracción, lo cual se desprende al observar el comportamiento y desarrollo de las rectas de regresión encontradas y sus respectivas pendientes. De acuerdo a ello, se encuentra nuevamente una mayor pendiente en el modelo correspondiente al Eurocódigo 2, discriminando así, algo mejor, la relación de variables entre los valores experimentales y los calculados. Sin embargo, su desarrollo tiende a subestimar la mayoría de los valores experimentales del hormigón autocompactante, ya que el mayor intervalo se desarrolla por debajo de la recta $y=x$ y tiende a incrementar estas diferencias a medida que los valores experimentales así lo hacen. Por otro lado, el modelo normativo correspondiente al ACI 363R-08 desarrolla la recta de regresión no sólo por encima del resto de los modelos normativos, sino que prácticamente consigue equilibrar los intervalos que sobrestiman y subestiman los valores de la resistencia a flexotracción experimentales del hormigón autocompactante, logrando con ello que la media de esos valores calculados coincida aproximadamente con la media de los valores experimentales, ajustando en promedio mucho mejor que el modelo normativo del Eurocódigo 2.

Nuevamente y al igual que en el análisis de las propiedades mecánicas anteriores, es conveniente realizar un análisis un poco más exhaustivo y estudiar otras alternativas. En la figura 13 se observa, por lo tanto, la relación existente entre los valores experimentales y las diferencias entre los valores calculados y experimentales para los dos modelos normativos considerados y en la tabla 6 las características principales del análisis de residuos así como de otros parámetros estadísticos.

En la figura 13 y en la tabla 6 puede observarse, que para el modelo normativo del ACI 363R-08, existe un mayor número de diferencias positivas entre los calculados y los me-

12

13

dados que en el caso del modelo normativo del Eurocódigo 2. Por otro lado, al observar estos porcentajes que representan tanto las diferencias positivas como las negativas, se puede apreciar cómo, para el caso del ACI 363R-08, el intervalo entre ellas es nuevamente el más reducido de todos (58%-42%), lo cual hace que dicho modelo normativo ajuste mejor y sea el más apropiado para evaluar la resistencia a flexotracción en el hormigón autocompactante, y no tanto el modelo normativo del Eurocódigo 2 que posee una diferencia entre positivos y negativos bastante más amplia (12%-88%).

De igual manera que en el caso del módulo de deformación, se cumple el mismo orden de ajuste de las diferencias de las medias entre los valores calculados y los valores medidos. Por todo ello puede decirse que el modelo normativo perteneciente al ACI 363R-08 es el que mejor se adapta para evaluar la resistencia a flexotracción en el hormigón autocompactante.

7. CONCLUSIONES

Como resumen del trabajo desarrollado pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- Los modelos de cálculo de las normas estudiadas con relación al módulo de deformación, la resistencia a tracción indirecta y

Tabla 6

Resistencia a flexotracción. Parámetros estadísticos de los valores experimentales y de los distintos modelos normativos evaluados

	Experimental	Resistencia a Tracción (MPa)	
		Calculado	
		ACI 363R-08	Eurocódigo 2
Mínimo (Mpa)	3,00	4,65	2,82
Máximo (Mpa)	10,30	9,14	8,51
Media (Mpa)	6,74	6,97	5,69
Desviación estándar (MPa)	1,68	0,99	1,26
Coefficiente de Variación	0,25	0,14	0,22
Diferencia entre Calculados y Medidos		-0,23	-1,05
ANÁLISIS DE RESIDUOS	$\Sigma +$	33,10	5,35
	n+	34,00	7,00
	%	58%	12%
	$\Sigma +/n+$	0,97	0,76
	$\Sigma -$	-19,69	-67,82
	n-	25,00	52,00
	%	42%	88%
	$\Sigma -/n-$	-0,79	-1,30
	Media ($(\Sigma + + \Sigma -)/n$)	0,89	1,24

la resistencia a flexotracción son aplicables al hormigón autocompactante, al haberse obtenido ajustes muy altos, con respecto a los valores medios de todos los datos.

- En cuanto a la dispersión de datos 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.
- Lo anterior 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 de los hormigones autocompactantes puede ser importante.
 - Los modelos del ACI pueden considerarse los más precisos para la determinación de todas las propiedades mecánicas, aunque en el caso de la resistencia a tracción indirecta, el modelo perteneciente al Eurocódigo 2 puede considerarse igual de preciso.
 - Es muy señalable que mientras todos los modelos estiman la resistencia a tracción indirecta de una forma bastante precisa, la estimación de la resistencia a flexotracción es bastante peor en general, lo que indica que puede existir un problema al trasladar el valor de la propiedad a un elemento tipo viga, que incluso puede ensayarse con disposiciones de carga diferentes. La única norma que tiene en cuenta el canto del elemento, el Eurocódigo 2, tampoco presenta mayor precisión que las otras.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Attiogbe, E.; See, H.; Daczko, J.: "Engineering Properties of Self-Consolidating Concrete", *First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete* (2002).
- (2) Horst, G.; Dusseldorf, J.: "Self-Compacting Concrete: Another Stage in the Development of the 5 Component System of Concrete", *Concrete Technology Report Verein Deutscher Zementwerke* (1999), pp.39-48
- (3) Tviksta, L. G.: "Report of Task 9: End Product, rational Production and Improved Working Environment through using SelfCompacting Concrete". *Brite EuRam project BRPR - CT 96 - 0366*, (2000). <http://scc.ce.luth.se/>
- (4) Persson, B.: "A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete." *Cem. Concr. Res.* Vol. 31 (2001), pp. 193-198.
- (5) Poon, C.; Ho, D.: "A feasibility study on the utilization of r-FA in SCC". *Cem. Concr. Res.* Vol. 34, (2004), pp. 2337-2339.
- (6) Koehler, E.; Fowler, D.: "Aggregates in Self-Consolidating Concrete." Aggregates Foundation for Technology, Research and Education (AFTRE), International Center for Aggregates Research (ICAR), University of Texas at Austin. March (2007).
- (7) Mata, L.: Implementation of Self-Consolidating Concrete (SCC) for Prestressed Concrete Girders. Master Thesis. North Carolina State University. Raleigh, North Carolina, U.S.A. (2004).
- (8) Turcry, P.; Loukili, A.; Haidar, K.; Pijaudier, G.; Belarbi, A.: "Cracking tendency of self-compacting concrete subjected to restrained shrinkage: experimental study and modeling". *Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE*, January-February (2006), pp. 46-54.
- (9) Holschemacher, K.; Klug, Y.: "A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC". *Lacer*, No. 7 (2002).
- (10) Domone, P. L.: "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete". *Cement & Concrete Composites*, Vol. 29 (2007), pp. 1-12.
- (11) Ouchi, M.: "Applications of Self Compacting Concrete in Japan, Europe and the United States". Kochi University of Technology, Kochi, Japan (2003).
- (12) EFNARC: The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification. Production and Use (2005).
- (13) Roziere, E.; Turcry, P.; Loukili, A.; Cussigh, F.: "Influence of paste volume, addition content and addition type on shrinkage cracking of self-compacting concrete". *SCC 2005: 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete*, Chicago, November (2005).
- (14) Brouwers, H.; Radix, H.: "Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study". *Cem. Concr. Res.*, Vol. 35 (2005), pp. 2116-2136.
- (15) Marti, J.; Serna, P.; Arbelaez, C.; Rigueira, V.: "Comportamiento adherente del hormigón autocompactante en transmisión y anclaje" *Mater. Construcc.*, Vol. 56, No. 284, Octubre-Diciembre (2006), pp. 27-42.
- (16) Klug, Y.; Holschemacher, K.: "Comparison of the hardened properties of self-compacting concrete and normal vibrated concrete". *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*. Reykjavic, Iceland (2003), pp. 596-605.
- (17) Coppola, L.; Cerulli, T.; Salvioni, D.: "Sustainable Development and Durability of Self-Compacting Concrete". *11th International Conference on Fracture*. Milan, Italy. (2004).
- (18) Sagoe, K.; Brown, T.; Taylor, A.: "Performance of Concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate". *Cem. Concr. Res.*, Vol. 31 (2001), pp. 707-712.
- (19) Leemann, A.; Hoffmann, C.: "Properties of self-compacting and conventional concrete – differences and similarities." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 57, No. 6, August (2005), pp. 315-319.

- (20) Turcry, P.; Loukili, A.; Haidar, K.: "Mechanical properties, plastic shrinkage, and free deformations of self-consolidating concrete". *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*. Chicago, EEUU (2002), pp. 335-340.
- (21) Griffin, M.; Kahn, L.; Kurtis, K.: "Preliminary Investigation of Self-Compacting Concrete". Structural Engineering Mechanics and Material Special Research Problem Report. Georgia Institute of Technology. Dec. 2002.
- (22) Horta, A.: *Evaluation of Self-Consolidating Concrete for Bridge Structure Applications*. Master's Thesis. Master of Science in Civil Engineering. Georgia Institute of Technology. Atlanta. U.S.A. 2005.
- (23) Cervantes, V.; Roesler, J.: "Ground Granulated Blast Furnace Slag". *Tech Note No. 35*. University of Illinois, Department of Civil and Environmental Engineering. 1211 NCEL, MC-250. Urbana. Illinois. U.S.A. (2007).
- (24) Gurjar, A.: "Mix Design and Testing of Self-Consolidating Concrete using Florida Materials". Final Report The Florida Department of Transportation. Department of Civil Engineering. Embry-Riddle Aeronautical University. Daytona Beach. Florida. U.S.A. (2004).
- (25) 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).
- (26) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE: Committee 318. Building code for structural concrete, ACI 318-08. ACI Manual of Concrete Practice 2008. ACI. Detroit, EEUU (2008).
- (27) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE: Committee 363. State of the art report on high strength concrete, ACI 363R-08. ACI Manual of Concrete Practice 2008. ACI. Detroit (2008).
- (28) EN 1992-1-1:2004 Design of concrete structures. European committee for standardization. (2004).
- (29) EHE-2008: *Instrucción Española de Hormigón Estructural 2008*. Ministerio de Fomento. Madrid. España. (2008).

* * *