

Estudio sobre los modelos de cálculo de la retracción de la EHE y del Eurocódigo EC-2 aplicados al hormigón autocompactable

G. Agranati Landsberger, J. Fernández Gómez

Departamento de Ingeniería de la Construcción, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España

RESUMEN

La retracción es una característica importante del hormigón para la evaluación de su comportamiento a largo plazo. Este trabajo ha consistido en la búsqueda y creación de una base de datos sobre la retracción en hormigón autocompactable (HAC) y hormigón convencional vibrado (HC) con el fin de evaluar la aplicabilidad de los modelos actuales también en el caso del HAC. Los modelos considerados son los incluidos en la EHE y en el Eurocódigo EC-2. Según los resultados obtenidos, cada modelo estima la retracción del HAC y HC con equivalente precisión, y no hace falta modificar estos modelos para su aplicación en HAC. Entre estos dos modelos, el Eurocódigo estima la retracción con mayor precisión.

1. INTRODUCCIÓN

El HAC, aunque se fabrica con los mismos componentes que el hormigón convencional vibrado, posee una clara diferencia en la composición final de la mezcla. En comparación con el hormigón convencional, el HAC tiene un alto volumen de adiciones, que pueden ser finos procedentes del machaqueo de caliza o ceniza volantes, mayor contenido de superplastificantes, y el tamaño máximo del árido es menor. Estas modificaciones en la composición de la mezcla también pueden influir sobre el comportamiento del hormigón en su estado endurecido, incluyendo la retracción.

El objetivo de este trabajo ha sido el estudiar la retracción del HAC en comparación con el hormigón convencional, con el fin de evaluar la aplicabilidad de los actuales modelos de cálculo de la retracción al HAC. El estudio posee dos partes: la primera incluye la creación de una base de datos de varios estudios publicados sobre la retracción en HAC. La base de datos contiene datos de 93 mezclas de HAC y 30 de HC. En la segunda parte del trabajo se utilizan los modelos de estimación de la EHE y el Eurocódigo y las condiciones específicas de cada mezcla para calcular la retracción. Se comparan los valores calculados con los datos recogidos en la base de datos utilizando varios métodos estadísticos (regresión lineal, análisis de residuos y coeficiente de variación).

2. BASE DE DATOS

La base de datos de retracción incluye un total de 123 mezclas de hormigón, de las cuales 93 son de HAC y 30 de HC.

Tabla 1. Resumen de las mezclas incluidas en la base de datos de retracción

	Fuente	n° mezclas HAC	n° mezclas HC	t _s * días	t** días	HR	Tipo de adición
1	INTEMAC	2	2	1	90	50%	caliza
2	Heirman et al.	6	1	1	56	60%	caliza, ceniza volante
3	Vieira et al.	1	1	3	180	50%	caliza, ceniza volante
4	Proust et al.	5	2	1	300	55%	caliza, humo de sílice
5	Chopin et. al	5	1	1	365	50%	caliza
6	Turcry et. al	2	2	1	112	50%	caliza
7	Assie et. al	1	1	7	170	50%	caliza
8	Bouzoubaa, et. al	8	1	7	224	50%	ceniza volante
9	Hans et. al	2	2	7	63	50%	caliza
10	Poppe et. al	4	0	1	500	60%	caliza
11	Poppe et. al	2	0	1	300	60%	caliza
12	xie, et. al	5	0	2	90	55%	ceniza volante
13	Persson	4	4	1	180	60%	filler de vidrio, caliza
14	Persson	3	4	1		60%	humo de sílice, quartzite
15	Suksawang et al.	4	1	1	90	50%	humo de sílice, ceniza volante, escoria
16	Khrapko	3	1	3	56	50%	ceniza volante, polvo de cantera
17	Brunner	15	0	0,1,2,6,90	360	65%	caliza
18	Song et al.	4	0	1	28	50%	escoria
19	See, et al.	4	1	1	160	50%	caliza
20	Mortsell, et al.	1	1	7	90	50%	humo de sílice
21	Persson	4	1	1	500,300,28	60%	caliza
22	Rols et al.	1		1	90	50%	caliza
23	Chan et al.	1	2	7	90	80%	ceniza volante
24	Sonebi et al.	4	2	7, 1	250	50%	escoria, caliza
25	Ozyildirim et al.	2	0	1	240	50%	escoria
Total n° de mezclas		93	30				

* t_s edad de comienzo de la retracción, días

** t edad final del hormigón, días

La Tabla 2 incluye el valor medio de algunos datos de interés relacionados con la dosificación de las mezclas.

Tabla 2. El valor medio de algunos datos relacionados con la dosificación de las mezclas.

	Cemento, Kg/m ³	Agua, Kg/m ³	Áridos, Kg/m ³	Adiciones, Kg/m ³	Agua/ cemento	Agua/ finos	Resistencia, f _{c28} , MPa
HAC	351	170	1660	152	0,51	0,34	55
HC	369	171	1801	12	0,48	0,47	46

3. RETRACCIÓN MEDIDA Y CALACULADA DE LAS MEZCLAS DE HAC Y HC.

La Fig. 1 muestra los valores de la retracción medida y calculada en función de la edad del hormigón, $t-t_s$.

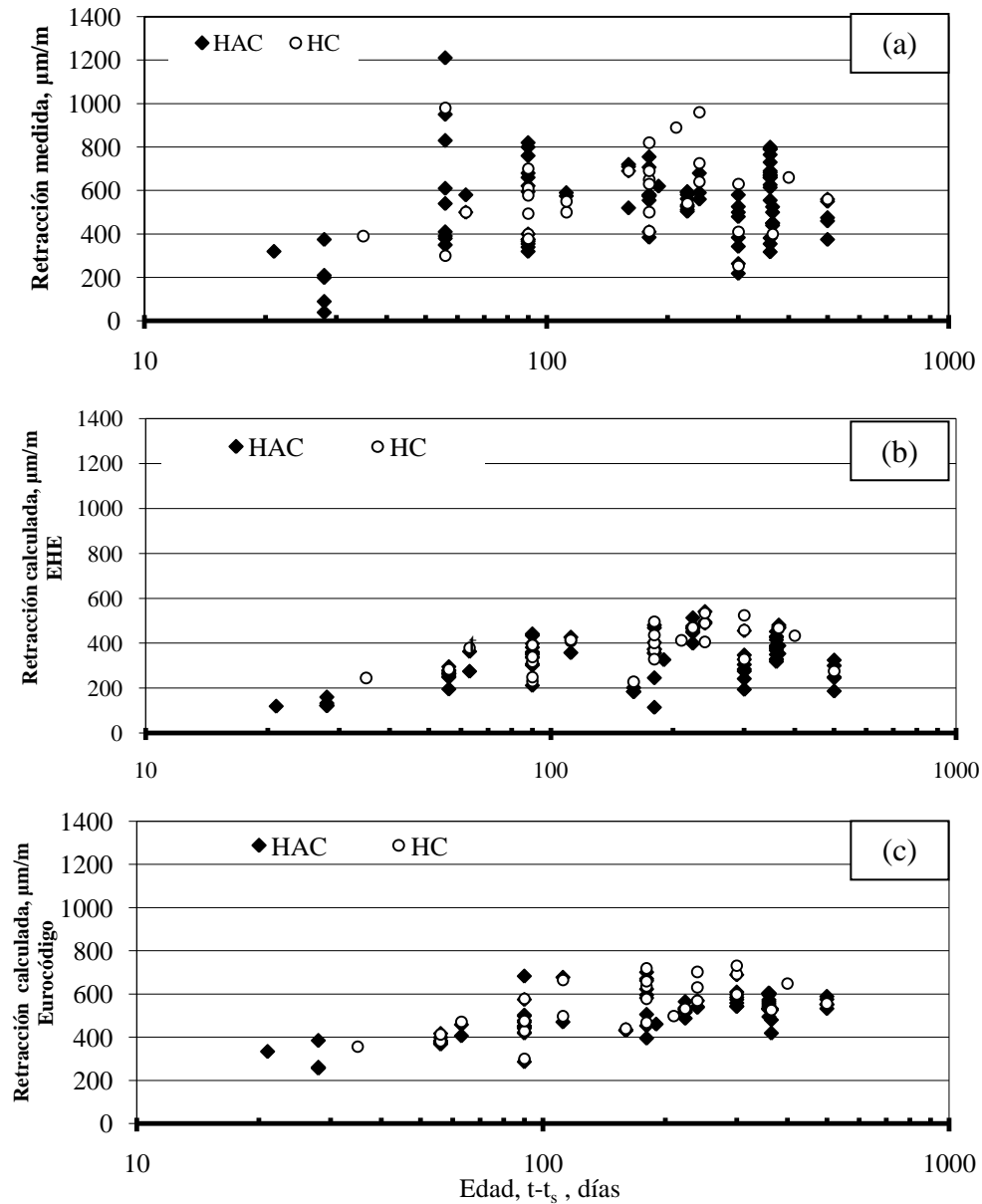


Fig. 1 Retracción de las mezclas del HAC y HC en función de la edad, $t-t_s$ (retracción medida (a), calculada EHE (b) calculada Eurocódigo(c)).

Evaluando visualmente las Figuras 1a, 1b y 1c, se observa que la dispersión de la retracción medida es bastante mayor en comparación con la dispersión de los valores calculados por ambos modelos. También se observa que la retracción aumenta de forma gradual hasta alcanzar una edad de aproximadamente 90 días, después de la cual los valores de la retracción se mantienen aunque con un alto grado de dispersión. Este comportamiento se debe a que la retracción es un fenómeno de larga duración y que su magnitud aumenta con la edad. Utilizando el modelo de la EHE, se puede considerar que a los 90 días el hormigón alcanza aproximadamente el 70% del valor último de la retracción (para hormigones de resistencia media 35 MPa, 50% HR, y $e = 50\text{mm}$).

La **Tabla 3** incluye algunos datos estadísticos sobre la retracción medida y la calculada.

Tabla 3. Datos estadísticos relacionados con la retracción medida y calculada de las mezclas de HAC y HC.

	experimental	EHE	EN 1992-1-1
HAC			
Máximo, $\mu\text{m/m}$	1210	540	701
Mínimo, $\mu\text{m/m}$	60	114	258
Media, μ , $\mu\text{m/m}$	539	337	528
desviación estándar, $\mu\text{m/m}$	182	105	99
HC			
Máximo, $\mu\text{m/m}$	980	534	731
Mínimo, $\mu\text{m/m}$	253	228	292
Media, μ , $\mu\text{m/m}$	581	377	537
desviación estándar, $\mu\text{m/m}$	181	89	124

De la Tabla 2 se observa que la retracción media del HAC y HC calculada por el Eurocódigo se aproxima más al valor medio experimental, y que el modelo de la EHE subestima la media de la retracción substancialmente. La retracción media es ligeramente mayor para el HC, tanto en el caso de los valores medidos como de los calculados.

4. ANALISIS DE LOS MODELOS DE ESTIMACION DE LA RETRACION

4.1 Regresión lineal

Uno de los métodos de análisis utilizados para evaluar los diferentes modelos de cálculo de la retracción es la estimación lineal. En este método se calcula la tendencia lineal de los datos utilizando un ajuste por mínimos cuadrados para obtener la recta que mejor representa la tendencia de los datos. El valor de la pendiente de la recta, m , muestra la tendencia de cada modelo al evaluar la retracción de las mezclas de HAC y HC. Se utiliza como referencia una recta con pendiente uno (1), que representa valores calculados que coinciden perfectamente con los medidos. El valor de la pendiente, m , es mayor que uno (1) para los modelos que tienden a sobreestimar la retracción y menor que uno (1) para los modelos la subestiman.

En la Fig. 2 se muestra la relación entre la retracción medida y calculada para los dos modelos de cálculo.

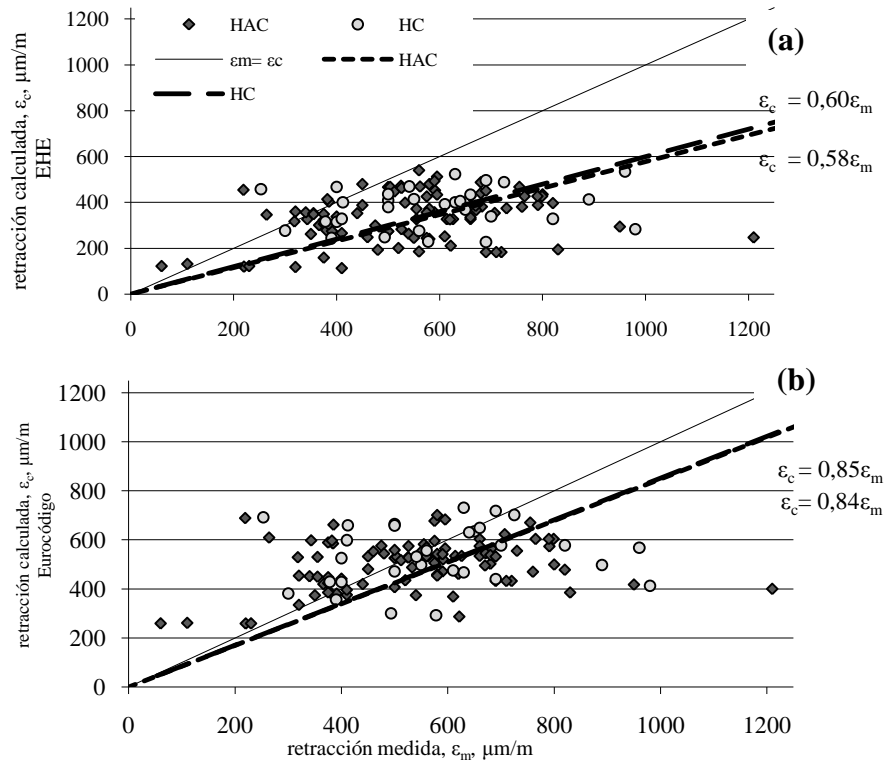


Fig. 2 Ajuste mediante regresión lineal para los modelos EHE y Eurocódigo EC-2.

De las Figs. 2a y 2b se observa que aunque hay diferencias en la evaluación de la retracción entre los dos modelos, la pendiente de la recta es equivalente entre el HAC y HC para cada modelo. Las pendientes, m , de las rectas utilizando la EHE son 0,58 y 0,60, para el HAC y HC, respectivamente, y para el Eurocódigo 0,85 y 0,84.

Aunque ambos modelos subestiman la retracción, el Eurocódigo se acerca más a los valores medidos.

En estas figuras se observa de forma clara cómo los valores de la retracción medida se dispersan sobre un rango mas ancho de valores, mientras que la retracción calculada se concentra en un rango más estrecho de valores.

4.2 Análisis de los residuos

El residuo es la diferencia entre la retracción calculada y la medida. Un valor positivo del residuo indica que el modelo sobreestima la retracción, mientras que un valor negativo indica que el modelo la subestima. En este método se considera mejor el

modelo para el cual los residuos están distribuidos de forma más igual entre el rango positivo y negativo, y se encuentran mejor centrados alrededor del eje.

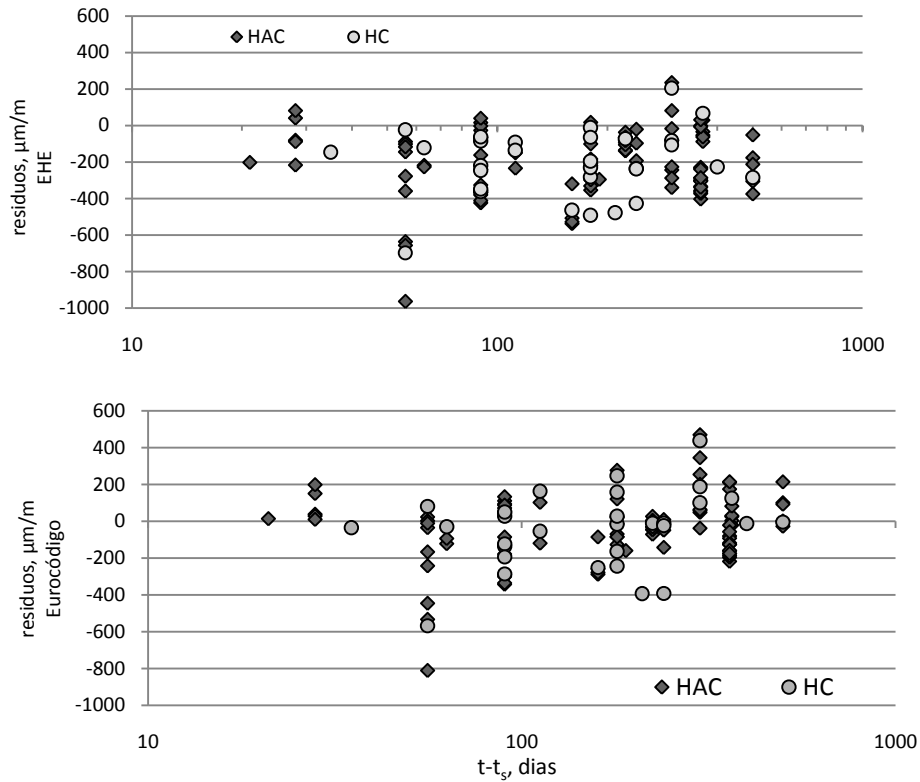


Fig. 3 Residuos de los modelos EHE y Eurocódigo en función de la edad del hormigón, $t-t_s$, para el HAC y HC.

En la Fig. 3 se observa que para el modelo EHE la mayoría de los residuos están en el rango negativo, mientras que para el Eurocódigo los residuos están mejor centrados y distribuidos alrededor del eje. Tampoco se observan diferencias notables entre los residuos de las mezclas del HAC y HC para ninguno de los modelos de estimación.

La Fig. 4 muestra la distribución de los residuos para cada modelo. El valor medio para la EHE resulta -202 y -205 $\mu\text{m/m}$ para el HAC y HC respectivamente, y para el Eurocódigo estos valores resultan -39 y -44 $\mu\text{m/m}$.

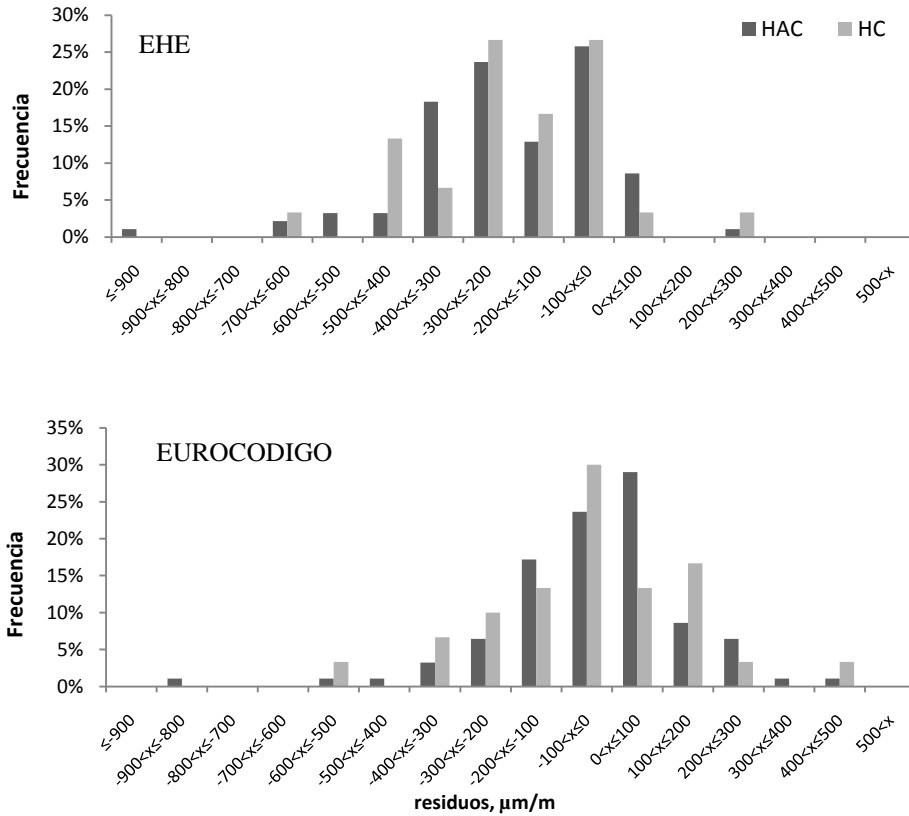


Fig. 4 Distribución de los residuos de la retracción de los modelos EHE y Eurocódigo.

Otro indicador que se utiliza para comparar la precisión de los modelos de estimación es calcular la suma de la raíz cuadrada de los residuos cuadrado, $\Sigma\sqrt{(R^2)}$. Al calcular la raíz de los residuos cuadrado se elimina el efecto de sumar residuos positivos y negativos, lo que permite comparar la media de los valores absolutos de los residuos. El modelo con menor valor de $\Sigma\sqrt{(R^2)}$ es el que mejor estima la retracción del hormigón.

La Tabla 4 incluye los valores de $\Sigma\sqrt{(R^2)}$ para ambos modelos. Los residuos del Eurocódigo son menores que los de la EHE para ambos tipos de hormigón, con valores para el HAC y HC de 132 y 152 $\mu\text{m/m}$ para el Eurocódigo, y 214 y 223 $\mu\text{m/m}$ para la EHE. También en este caso los resultados son equivalentes entre el HAC y HC para cada modelo de cálculo.

Tabla 4. Valores de $\Sigma\sqrt{(R^2)}$, para el HAC y HC según los modelos de estimación de la retracción.

	EHE		Eurocódigo	
	Residuos “+”	Residuos “-”	Residuos“+”	Residuos “-”
HAC				
$\Sigma \sqrt{\Sigma R^2}$	545	-19371	4293	-7946
n° de datos	9	84	43	50
Media “+”/ “-”, $\mu\text{m/m}$	61	231	100	159
Media absoluta de R del conjunto de datos, $\mu\text{m/m}$	214		132	
HC				
$\Sigma \sqrt{\Sigma R^2}$	275	-6412	1615	-2936
n° de datos	2	28	11	19
Media “+”/ “-”, $\mu\text{m/m}$	137	229	147	155
Media absoluta de R del conjunto de datos, $\mu\text{m/m}$	223		152	

4.3 Coeficiente de variación

Otro método utilizado para analizar la precisión de los modelos de estimación en calcular la retracción del HAC y HC es el coeficiente de variación ω . El valor del coeficiente de variación, ω , varía entre 0 y 1. Se considera más preciso el modelo con el coeficiente de variación menor.

Tabla 5 El coeficiente de variación, ω , del HAC y HC para los modelos de cálculo.

	EHE	EUROCODIGO
HAC	0,51	0,35
HC	0,48	0,37

Aunque el coeficiente de variación es bastante alto para ambos modelos, el Eurocódigo es más preciso que la EHE para el HAC y HC, con valores de 0,35 y 0,37, respectivamente.

También en este método de análisis, para cada modelo de cálculo el coeficiente de variación, ω , es similar entre el HAC y HC.

5. CONCLUSIONES

En este estudio se presenta una extensiva base de datos con resultados de retracción para HAC y se evalúa la aplicabilidad de los modelos de estimación de la EHE y del Eurocódigo a este tipo de hormigón. Aunque es aconsejable utilizar datos de mayor duración, existe una tendencia clara de los datos que permite establecer las siguientes conclusiones:

1. Los valores de la retracción calculados por los dos modelos de cálculo se concentran un margen estrecho de valores, mientras que la retracción medida muestra una dispersión bastante elevada.

2. Aunque existen diferencias en la estimación de la retracción de los dos modelos, para cada modelo no hay diferencias significativas entre la estimación de la retracción entre el HAC y HC, y por lo tanto pueden considerarse aplicables por igual para estos dos tipos de hormigón.
3. Considerando los métodos de análisis estadísticos empleados es evidente que el Eurocódigo estima mejor la retracción del HAC y HC. El modelo de la EHE subestima substancialmente la retracción de ambos hormigones.

REFERENCIAS

- ASSIE, S., ESCADEILLAS, G., MARCHESE(2003), G. ,Durability of self compacting concrete, *RILEM Proceedings PRO 33*, pp. 655-662.
- BAZANT, Z.P. (1995), Creep and shrinkage prediction models for analysis and design of concrete structures-model B3. *Material and Structures*, vol. 28 ,pp.357-365.
- BOUZOUBAA, N., LACHEMI, M. (2001): Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash. *Cement Concrete*, vol. 31, pp. 413-442.
- BRUNNER, M. (2003), Durability of SCC with high water content, *Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidation Concrete*, pp. 333-339.
- CHAN, Y.W., CHERN, J.C., HONG, C.Y., LUE, J.W. (2004), The analysis of Shrinkage behavior of SCC and OPC under various weather conditions, *RILEM Proceedings PRO 17*.
- CHAN, Y.W., CHERN, J.C., HONG C.Y., LUE, J.W. (2000), The analysis of shrinkage behavior of SCC and OPC under various weather conditions. *RILEM Proceedings PRO 17 Shrinkage*.
- CHOPIN, D., FRANCY, O., LEBOURGEOIS, S., ROUGEAU, P. (2003), Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete (SCC), *RILEM Proceedings PRO 33*, pp. 672-683.
- EHE(2002), Instrucción de Hormigón Estructural, Comisión Permanente del Hormigón, 5º edición, Madrid, Ministerio de Fomento.
- HANS,E.G., PENTTI, P. (1999), Properties of SCC-Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance, *RILEM PRO 7*.
- HEIRMAN, G., VANDEWALLE, L. (2003), The Influence of fillers on the properties of self compacting concrete in fresh and hardened state. *RILEM Proceedings PRO 33*, pp. 606-618.
- INTEMAC (2005), Informe sobre la investigación desarrollada para comparar las propiedades mecánicas de los hormigones convencionales y autocompactantes. Doc. N° TI/LC-05003.
- KHRAPKO, M. (2003), Development of SCC containing quarry rock dust, *Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidation Concrete*, pp. 203-209.
- MØRTELL, E., RODUM, E.(2001), Mechanical and durability aspects of SCC for road structures, *Proceeding of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 459-467.
- POPPE, A., DE SCHUTTER, G. (2005), Creep and shrinkage of self compacting concrete, *RILEM Proceedings PRO 42*, pp. 329-336.
- PONS, G., PROUST, E., ASSIE, S. (2003) Creep and Shrinkage of self compacting concrete: A Different Behavior compared with Vibrated Concrete? *RILEM Proceedings PRO 33*, pp. 645-654.

- PROUST, E., PONS, G.(2001), Macroscopic and microscopic behavior of self compacting concrete creep and shrinkage, *Creep shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials*, edited by F.J. Ulm, Z.P. Bazant, W.H. Whittman, Elsevier.
- PERSSON, B. (2004), Shrinkage and strength of self-compacting concrete with different kinds of filler, *RILEM Proceedings PRO 17*.
- PERSSON, B. (1999), Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete , *RILEM Proceedings PRO 7*.
- POPPE, A.M., DE SCHUTTER, G. (2001) Creep and shrinkage of self-compacting concrete, *Creep shrinkage and durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials*, edited by F.J. Ulm, Z.P. Bazant, W.H. Whittman, Elsevier, pp. 563-568.
- PERSSON, B. (2005), Shrinkage and creep of high performance self-compacting concrete (HPSCC), *ACI special Publication SP220-11*, pp.155-179.
- ROLS, S., AMBROISE, J., PERA, J. (), Effect of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete, *Cement and Concrete Research*, n° 29, 1999, pp. 261-266.
- SONG, H.W., BYUN K.J., KIM, S.H., CHOI, D.H. (2001), Early creep and shrinkage in self compacting concrete incorporating GGBFS, *Proceeding of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 413-421.
- SUKSAWANG, N., NASSIF, H.F., NAJM, H.S. (2003) , Durability of self-compacting concrete (SCC) with pozzolanic materials. *Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidation Concrete*, pp. 305-310.
- SONEBI, M., BARTOS, P.J.M., ZHU, W., GIBAS, J., TAMIMI, A. (2000), *Brite EuRam Project BRPR-CT96-0366, Task 4-Properties of Hardened SCC concrete*,.
- OZYILDRIRIM, C., LANE, S. D. (2003), Evaluation of self-consolidating concrete-Final Report, Virginia Transportation Research Council, CT96-03-13.
- SEE, H.T., ATTIOGBE, E.K. (2005), Performance of self-consolidating concrete under restrained shrinkage, *ACI special Publication, SP227-14*, pp. 303-315.
- TURCRY, F., LOUKILI, A., HAIDER, K. (2003) Mechanical Properties, Plastic shrinkage, and free deformation of Self-consolidating concrete. *Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidation Concrete*, pp. 152-158,.
- VIEIRA, M., BETTENCOURT, A.(2003) Deformability of Hardened SCC. *RILEM Proceedings PRO 33*, 606-618.
- XIE, Y., LI, Y., LONG, G. (2005), Influence of aggregate on properties of self consolidating concrete, *RILEM Proceedings PRO 42*, pp. 161-171.