

METODOLOGIA DE MODELACION DE PROPIEDADES DE HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO

METHODOLOGY FOR MODELING HIGH PERFORMANCE CONCRETE PROPERTIES

Por / By Carlos Videla, Cristián Gaedicke

Resumen

En esta investigación, se analizan las propiedades más importantes de Hormigones de Alto Desempeño (HPC por sus siglas en inglés). El estudio se centró en HPC con resistencia cilíndrica a compresión especificada a 28 días entre 60 y 110 MPa y fabricados con materiales locales: cemento portland siderúrgico de alta resistencia inicial, áridos silicios y aditivos comerciales. Se analizaron las propiedades de resistencia a compresión, a tracción por flexión y a la abrasión, el módulo de elasticidad y la retracción autógena e hidráulica y se modelaron usando métodos innovadores. Los resultados de ensayos de laboratorio muestran que es posible desarrollar un modelo general para la resistencia a compresión combinando una ecuación hiperbólica para la evolución de la resistencia y una ecuación exponencial para los parámetros de dosificación de la mezcla. También se concluye que los módulos de elasticidad medidos son menores que los valores estimados por las ecuaciones de ACI 363 y ACI 318, y que la raíz cuadrada de la resistencia a compresión no es un buen estimador de la resistencia a tracción por flexión. Además, se concluyó que el ensayo de abrasión ASTM C944-99 no es efectivo para medir la resistencia a la abrasión de HPC, debido a la alta variabilidad de los resultados. Las mediciones de deformaciones volumétricas del hormigón, muestran que la retracción autógena es una componente significativa de la retracción total. Se demuestra que el modelo de predicción FIB 2000 es adecuado para estimar la retracción de HPC, pero que se deben calibrar sus coeficientes para las condiciones locales. Se aplicó exitosamente un método de calibración de los modelos de retracción.

Palabras clave: *hormigón de alto desempeño, Cemento Pórtland Siderúrgico, resistencia a compresión, resistencia a flexotracción, módulo de elasticidad, resistencia a la abrasión, retracción autógena, retracción hidráulica.*

Abstract

In this research, the most important properties of HPC were analyzed. The study was focused on HPC with specified 28 days compressive cylindrical strengths between 60 to 110 MPa and made with locally available materials: Rapid Hardening Portland Blast Furnace Slag Cement, siliceous aggregates and commercial admixtures. Compressive and flexural strength, elastic modulus, abrasion resistance and shrinkage properties were analyzed and modeled using innovative methods. Laboratory test results showed that it is possible to develop a general model for compressive strength combining a hyperbolic equation for strength evolution and an exponential equation for mix design parameters. It was also concluded that the measured moduli of elasticity are lower than the predicted values by ACI 363 and ACI 318 equations, and that the square root of the compressive strength did not turn out to be a good predictor of the flexural strength, for the used materials. Furthermore, it was concluded that the ASTM C944-99 abrasion test is not very effective to measure abrasion resistance of HPC, due to the high variability of results. Strain measurements showed that autogenous shrinkage is a significant part of the total shrinkage. It was shown that the FIB 2000 model is adequate to predict shrinkage of HPC, but some coefficients must be updated to local conditions. An updating method for shrinkage models was successfully applied.

Keywords: *high performance concrete, BFS Cement, compressive strength, flexural strength, elastic modulus, abrasion resistance, autogenous shrinkage, drying shrinkage.*



1. INTRODUCCION

La tendencia actual en proyectos de construcción es aumentar los requerimientos exigidos a los hormigones y la especificación de estándares más exigentes, implicando en forma concreta hormigones más resistentes, más trabajables, más durables y con mayor estabilidad volumétrica. Estos hormigones reciben el nombre genérico de Hormigones de Alto Desempeño o High Performance Concrete HPC por su denominación en inglés (ACI, 1996). Para hacer frente a estos nuevos requerimientos, es necesario conocer el comportamiento de diferentes propiedades del hormigón fabricado bajo condiciones locales. Por tal motivo es de vital importancia verificar la aplicabilidad de modelos de comportamiento existentes y en caso necesario calibrarlos y/o adaptarlos a dichas condiciones particulares. Asimismo, la dosificación de hormigones para satisfacer los altos estándares exigidos genera la necesidad de buscar formas innovadoras para modelar las propiedades del HPC.

2. OBJETIVO E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

El principal objetivo de esta investigación fue caracterizar y modelar las propiedades más importantes de HPC, utilizando métodos innovadores que permitan evaluar y correlacionar diferentes modelos de comportamiento propuestos en la literatura especializada, con la explotación del total de los resultados de un vasto programa experimental. Si bien muchos de estos conceptos pueden ser aplicados a un rango importante de hormigones y propiedades, su aplicación se centró en HPC de trabajabilidad fluida y con resistencias entre 60 y 110 MPa, utilizando como materiales cemento portland siderúrgico de alta resistencia inicial, micro-sílice, árido grueso y fino silíceo chancado, aditivo plastificante y aditivo superplastificante. Las propiedades estudiadas fueron: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la flexotracción, resistencia al desgaste y retracción autógena e hidráulica.

La verificación, calibración o desarrollo de modelos de las propiedades más importantes de HPC fabricado con materiales disponibles localmente, es vital para ampliar el conocimiento respecto a este material y fomentar y facilitar la utilización de HPC en proyectos de ingeniería. Además, uno de los aportes significativos es el desarrollo de un modelo general de resistencia a compresión, integrando un modelo de evolución de resistencia en el tiempo con otro que correlaciona la resistencia con las variables de dosificación. Asimismo se verifican y calibran los modelos ACI 363 (1992) y ACI 318 (2002) para módulo de elasticidad y resistencia a la tracción por flexión y el modelo FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000) para retracción para su aplicación en condiciones locales.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Factorial del experimento

Se diseñó un programa experimental para modelar las propiedades de HPC, que se presenta en el factorial de la Tabla 1.



de norma NCh. 148 Of.68 (INN, 1968) y puede clasificarse como Tipo IS según ASTM C 5957 (ASTM, 1998a). Por su parte la escoria de lato horno tenía un módulo de Eitel $[(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2]$ de 1,76, relación CaO/SiO_2 de 1,26 y 43,6% de contenido de cal.

Además se usó una microsílíce comercial, seca y no compactada, de la producción de silicio. Contiene sobre 90% SiO_2 , y tiene una superficie específica de $20\text{ m}^2/\text{g}$. El peso específico de la microsílíce es 2,22, el pH es 7,0 y el tamaño medio de partículas $0.15\ \mu\text{m}$.

Los áridos usados son de naturaleza silíce. El árido grueso es chancado, con tamaño máximo nominal de 12 y 20 mm. El árido fino es una mezcla de partículas chancadas y rodadas. La granulometría y propiedades físicas de los áridos se presentan en Tabla 2.

Tabla 2. Granulometría y propiedades físicas de los áridos

Tamiz (mm)	Arido grueso		Arido fino
	Tamaño máximo nominal (mm)		
	20	12	
	Porcentaje acumulado que pasa (%)		
25	100	100	100
20	99	100	100
12,5	56	100	100
10	29	89	100
5	2	22	85
2,50	0	2	75
1,25	0	1	65
0,63	0	1	48
0,315	0	1	25
0,160	0	1	9
Módulo de finura	6,70	5,83	2,93
Peso específico	2,707		2,689
Absorción (%)	1,43		1,15

En las mezclas de hormigón se usó un aditivo plastificante en base a lignosulfonatos, tipo D según ASTM C 494 (ASTM, 1998b). El plastificante es café oscuro y tiene un 35 % de sólidos. En todas las amasadas de hormigón se usó una dosis de aditivo plastificante de 0.5% en peso respecto al cementante.

Además, para alcanzar la consistencia fluida especificada en las amasadas de hormigón, se usó un aditivo superplastificante en base a un condensado de naftaleno formaldeído sulfonado, tipo F según ASTM C 494 (ASTM, 1998b). El superplastificante es café oscuro y tiene un 40 % de sólidos.

3.3 Dosificación, fabricación y ensayos del hormigón fresco

Los hormigones de prueba fueron dosificados utilizando la dosis de árido grueso recomendada por el método ACI 211 (1993), “Guía para la dosificación de hormigones de alta resistencia con uso de cenizas volantes”. La dosis de agua se determinó, para cada tamaño máximo del árido grueso, mediante hormigones de prueba de modo de alcanzar un asentamiento de cono de $70 \pm 10\text{ mm}$, sin el uso de superplastificantes. Las dosis de microsílíce y de cemento se calcularon a partir de las cantidades de agua determinadas previamente y de las variables independientes especificadas. Finalmente, la arena se dosificó por el método volumétrico. Se fabricaron hormigones de prueba de 0.2 m^3 , que fueron mezclados según el procedimiento de ASTM C 192 (ASTM, 1998b) en una betonera de eje vertical de 0.25 m^3 de capacidad. La dosis de superplastificante tipo F no fue fija y varió entre 1.4 y 2.2% respecto al peso de cementante, ya que para cada hormigón se utilizó la cantidad necesaria para lograr un asentamiento de cono en general superior a 100 mm. Las dosificaciones diseñadas, corregidas por rendimiento, y los resultados de los ensayos de hormigón fresco se muestran en la Tabla 3. De cada amasada se extrajeron 14 cilindros estándar, 6 probetas prismáticas de $75 \times 75 \times 285\text{ mm}$ y 4 viguetas de $150 \times 150 \times 600\text{ mm}$ de acuerdo con ASTM C 172 (ASTM, 1998b), las que se desmoldaron a las 24 ± 2 horas después de fabricado el hormigón.



Tabla 3. Dosificación mezclas de prueba y propiedades del hormigón fresco

Mezcla número	Árido grueso, kg	Árido fino, kg	Cemento, kg	Microsilice, kg	Agua, kg	Plastificante, kg	Superplastificante, kg	Asentamiento de cono, mm	Aire atrapado, %	Mezcla número	Árido grueso, kg	Árido fino, kg	Cemento, kg	Microsilice, kg	Agua, kg	Plastificante, kg	Superplastificante, kg	Asentamiento de cono, mm	Aire atrapado, %
H12-0.35-0	1119	670	493	0	168	2,5	8,9	140	2,0	H20-0.38-0	1163	700	447	0	166	2,2	7,1	160	1,4
H12-0.35-3	1114	661	476	15	167	2,5	8,8	100	2,2	H20-0.38-3	1165	696	434	13	166	2,2	8,1	100	1,3
H12-0.35-6	1113	655	461	29	167	2,5	7,8	135	1,9	H20-0.38-6	1160	688	419	27	165	2,2	7,1	135	1,4
H12-0.35-9	1118	652	448	44	168	2,5	8,9	160	1,7	H20-0.38-9	1168	687	408	40	166	2,2	8,1	100	1,3
H12-0.32-0	1114	625	535	0	166	2,7	8,6	145	2,2	H20-0.35-0	1158	662	482	0	164	2,4	6,7	140	1,3
H12-0.32-3	1113	618	519	16	166	2,7	8,6	150	2,3	H20-0.35-3	1172	664	473	15	166	2,4	8,8	110	1,3
H12-0.32-6	1116	614	504	32	167	2,7	9,7	135	1,9	H20-0.35-6	1155	649	452	29	164	2,4	6,7	160	1,5
H12-0.32-9	1110	604	485	48	166	2,7	9,6	135	1,8	H20-0.35-9	1148	640	434	43	163	2,4	6,7	145	1,6
H12-0.29-0	1118	577	591	0	166	3,0	10,6	95	2,4	H20-0.32-0	1156	620	525	0	163	2,6	8,4	125	1,8
H12-0.29-3	1122	572	575	18	167	3,0	10,7	120	2,2	H20-0.32-3	1163	618	512	16	164	2,6	8,4	165	1,5
H12-0.29-6	1123	565	558	36	167	3,0	11,9	120	2,4	H20-0.32-6	1146	603	489	31	162	2,6	7,3	180	N/A
H12-0.29-9	1121	558	539	53	166	3,0	11,8	120	2,2	H20-0.32-9	1150	599	475	47	162	2,6	8,3	165	1,3
H12-0.26-0	1122	517	659	0	165	3,3	14,5	40	2,5	H20-0.29-0	1165	576	582	0	163	2,9	10,5	105	1,7
H12-0.26-3	1126	512	641	20	166	3,3	13,2	35	2,1	H20-0.29-3	1149	561	556	17	161	2,9	8,0	140	1,7
H12-0.26-6	1114	498	615	39	164	3,3	13,1	55	2,2	H20-0.29-6	1155	558	542	35	162	2,9	8,1	145	1,7
H12-0.26-9	1123	496	600	59	166	3,3	11,9	150	2,3	H20-0.29-9	1173	559	533	53	165	2,9	10,5	105	1,8
HR12-0.26-9	1107	488	592	59	163	3,3	11,7	165	1,8	HR20-0.35-9	1144	638	433	43	162	2,4	7,6	135	1,7
HR12-0.26-3	1115	507	635	20	164	3,3	11,8	175	1,8	HR20-0.32-6	1134	597	484	31	160	2,6	9,3	140	1,6
HR12-0.35-0	1114	667	491	0	167	2,5	7,8	175	1,7	HR20-0.29-3	1149	561	556	17	161	2,9	8,0	120	1,7
HR12-0.32-3	1105	614	515	16	165	2,7	8,5	150	1,8	HR20-0.29-6	1147	554	538	34	161	2,9	8,0	125	1,8

3.4 Ensayos del hormigón endurecido

Se realizaron ensayos de resistencia cilíndrica a compresión (f_c), en 2 probetas cilíndricas de 150 x 300 mm, según ASTM C 39 (ASTM, 1998b), a la edad de 1, 3, 7, 28 y 56 días. También se ejecutó el ensayo de módulo de elasticidad (E_c), en 2 probetas cilíndricas de 150 x 300 mm, según ASTM C 469 (ASTM, 1998b), a la edad de 3 y 28 días. La resistencia a tracción por flexión (f_r), se midió a 1, 3 y 28 días según ASTM C 78 (ASTM, 1998b), utilizando una vigueta de 150 x 150 x 600 mm para las edades de 1 y 3 días, y dos viguetas para 28 días. También se determinó la resistencia a la abrasión (A_c) del hormigón a edad de 28 días, según ASTM C944 (ASTM, 1998b), midiendo con un deformómetro la profundidad de la huella en milímetros. El ensayo de desgaste se realizó aplicando una carga de 198 Newton en 3 ciclos de 2 minutos, llegando a un tiempo de desgaste de 6 minutos. Este ensayo se repitió en tres lugares diferentes de la probeta, para luego obtener el desgaste promedio. La Tabla 4 resume las propiedades mecánicas medidas del hormigón endurecido.



Tabla 4. Propiedades del hormigón endurecido

Mezcla número	Resistencia a compresión, MPa					Módulo de elasticidad, MPa		Resistencia a flexotracción, MPa				Resistencia a la abrasión, mm	Mezcla número	Resistencia a compresión, MPa					Módulo de elasticidad, MPa		Resistencia a flexotracción, MPa				Resistencia a la abrasión, mm
	f_{c1}	f_{c3}	f_{c7}	f_{c28}	f_{c56}	E_{c3}	E_{c28}	f_{r1}	f_{r3}	f_{r28}	A_{c28}	f_{c1}		f_{c3}	f_{c7}	f_{c28}	f_{c56}	E_{c3}	E_{c28}	f_{r1}	f_{r3}	f_{r28}	A_{c28}		
H12-0.35-0	30,6	50,9	65,8	84,2	89,4	25.723	33.284	3,9	5,7	9,1	0,35	H20-0.38-0	21,2	42,2	54,7	73,4	81,4	25.419	33.923	2,8	4,7	7,2	0,87		
H12-0.35-3	31,2	47,6	63,1	79,5	87,0	26.856	32.284	4,1	5,3	9,7	0,47	H20-0.38-3	31,3	47,8	63,1	78,0	85,9	N/A	32.450	3,5	5,7	8,7	0,52		
H12-0.35-6	29,0	45,9	61,7	82,6	87,4	25.844	32.311	3,4	5,0	9,5	0,47	H20-0.38-6	28,1	44,5	58,7	80,6	89,0	N/A	34.743	3,3	4,7	8,8	0,52		
H12-0.35-9	25,7	45,8	61,7	90,0	92,3	22.826	32.803	3,5	5,2	10,8	0,30	H20-0.38-9	23,2	43,8	59,7	83,1	84,6	26.290	34.494	3,2	5,1	8,1	0,63		
H12-0.32-0	28,1	50,8	66,7	82,2	86,3	26.282	32.538	2,7	6,0	10,9	0,25	H20-0.35-0	23,8	43,9	59,8	73,4	80,1	N/A	33.495	2,8	5,1	8,7	0,58		
H12-0.32-3	27,4	49,7	69,6	83,6	84,7	26.357	32.372	2,8	5,8	11,6	0,53	H20-0.35-3	25,3	49,5	67,1	82,0	87,8	N/A	34.423	3,1	5,8	10,4	0,55		
H12-0.32-6	38,3	54,2	68,0	86,9	87,8	26.846	34.159	4,4	5,9	9,8	0,18	H20-0.35-6	31,5	46,3	61,0	79,6	85,5	24.405	33.820	3,6	4,7	10,4	0,60		
H12-0.32-9	30,9	51,6	66,9	90,8	98,0	26.897	34.835	4,1	5,8	9,8	0,29	H20-0.35-9	27,1	41,5	58,5	75,6	79,0	24.769	32.246	3,1	4,3	9,0	0,44		
H12-0.29-0	29,2	56,0	72,9	90,4	93,6	27.772	35.265	3,8	6,3	9,6	0,40	H20-0.32-0	32,2	54,3	67,8	82,6	88,1	28.529	35.288	3,5	6,0	10,0	0,93		
H12-0.29-3	32,4	57,1	74,7	91,8	99,0	28.528	34.624	4,0	6,4	11,8	0,27	H20-0.32-3	27,9	50,5	68,4	80,7	85,9	26.860	34.609	3,3	5,9	10,1	0,64		
H12-0.29-6	41,3	62,3	83,9	100,6	110,2	28.554	37.168	4,2	7,1	12,8	0,19	H20-0.32-6	30,1	45,1	59,1	78,0	90,8	25.494	34.594	3,1	5,1	10,1	0,37		
H12-0.29-9	40,6	61,6	82,0	106,9	111,1	29.489	36.365	3,9	6,9	12,3	0,09	H20-0.32-9	33,4	51,6	65,4	86,1	91,2	25.663	34.291	3,9	5,3	9,4	0,22		
H12-0.26-0	34,2	62,3	81,2	95,3	97,2	27.201	35.107	4,2	8,4	11,6	0,27	H20-0.29-0	39,0	61,1	75,4	94,7	96,9	29.084	36.206	4,2	7,1	10,1	0,93		
H12-0.26-3	41,9	61,5	80,8	111,2	113,7	30.280	37.599	4,0	8,4	13,4	0,43	H20-0.29-3	34,0	55,1	68,6	83,0	88,1	25.863	34.968	3,4	6,0	10,3	0,27		
H12-0.26-6	40,4	62,4	86,5	107,1	109,8	29.951	37.370	2,4	8,2	14,0	0,30	H20-0.29-6	30,3	53,5	69,9	84,6	88,5	26.798	34.811	3,5	6,0	10,3	0,25		
H12-0.26-9	34,5	58,9	80,4	101,4	102,4	24.166	33.905	4,5	7,0	11,2	0,27	H20-0.29-9	42,2	63,7	81,0	100,8	98,4	29.100	36.808	4,5	7,0	9,7	0,21		
HR12-0.26-9	47,4	68,8	86,8	90,9	99,9	N/A	34.324	5,3	8,7	11,7	0,93	HR20-0.35-9	32,7	46,3	60,6	63,1	82,2	N/A	N/A	3,7	5,0	9,7	0,22		
HR12-0.26-3	47,5	70,5	86,8	98,8	105,7	N/A	36.913	5,4	8,6	11,8	0,39	HR20-0.32-6	36,2	54,4	68,8	89,7	93,6	N/A	N/A	4,9	6,4	10,9	0,34		
HR12-0.35-0	29,4	50,8	64,0	82,3	86,6	N/A	33.273	3,3	5,7	8,6	0,30	HR20-0.29-3	36,5	55,8	67,6	74,8	85,6	N/A	N/A	4,2	6,3	10,6	0,44		
HR12-0.32-3	31,6	55,7	71,4	94,9	97,4	N/A	31.336	3,8	6,5	9,3	0,64	HR20-0.29-6	34,2	54,1	67,6	88,9	89,7	N/A	N/A	3,9	6,2	11,2	0,62		

3.5 Ensayos de retracción del hormigón endurecido

La retracción autógena y la retracción hidráulica total fueron medidas de acuerdo a la norma ASTM C490 (ASTM, 1998b), usando 3 probetas de 75 x 75 x 285 mm para cada tipo de retracción, a las edades de 1, 3, 6, 7, 8, 11, 14, 21, 28, 35, 63, 97, 119, 180 y 231 días. La retracción hidráulica total se midió en probetas sometidas a curado bajo agua durante 7 días, y luego secado estándar a una temperatura de 23 ± 2 °C y humedad relativa $50 \pm 4\%$. La retracción autógena (ϵ_{as}) se midió en probetas selladas con parafina sólida después de desmoldar, para evitar la pérdida de agua. Fueron almacenadas a 23 ± 2 °C de temperatura, y se pesaron continuamente para eliminar del análisis aquellas que perdieran masa. La retracción hidráulica o por secado (ϵ_{sh}) se calculó como la diferencia entre la retracción hidráulica total y la retracción autógena. En las Tablas 5 y 6 se presentan los resultados de las mediciones de retracción autógena y retracción hidráulica, respectivamente. También se realizó mediciones de pérdida de peso de todas las probetas. En las tablas no se incluyen los hormigones HR12-0.35-0, HR12-0.32-3, H20-0.35-0, H20-0.35-3, H20-0.35-6, H20-0.32-0 y H20-0.29-0 que fueron eliminados debido a que las probetas de retracción autógena presentaron pérdida de peso.



Tabla 5. Retracción autógena del hormigón (mm/m)

Mezcla número	Edad t, días														
	1	2	6	7	8	11	14	21	28	35	63	97	119	180	231
H12-0.35-0	0.000	0.142	0.158	0.175	0.173	0.183	0.227	0.243	0.276	0.313	0.390	0.463	0.467	0.464	0.488
H12-0.35-3	0.000	0.052	0.085	0.089	0.103	0.108	0.141	0.162	0.193	0.184	0.278	0.281	0.365	0.308	0.344
H12-0.35-6	0.000	0.068	0.098	0.107	0.120	0.125	0.157	0.176	0.173	0.179	0.274	0.251	0.330	0.285	0.307
H12-0.35-9	0.000	0.111	0.125	0.135	0.145	0.152	0.190	0.204	0.224	0.239	0.316	0.331	0.342	0.401	0.404
H12-0.32-0	0.000	0.096	0.152	0.173	0.178	0.195	0.237	0.261	0.285	0.275	0.304	0.335	0.419	0.377	0.371
H12-0.32-3	0.000	0.119	0.163	0.179	0.187	0.192	0.228	0.245	0.276	0.259	0.255	0.300	0.388	0.327	0.325
H12-0.32-6	0.000	0.088	0.106	0.142	0.118	0.134	0.150	0.188	0.207	0.220	0.285	0.291	0.297	0.312	0.319
H12-0.32-9	0.000	0.079	0.145	0.182	0.164	0.173	0.187	0.230	0.241	0.266	0.316	0.357	0.364	0.388	0.382
H12-0.29-0	0.000	0.069	0.104	0.124	0.117	0.146	0.154	0.186	0.210	0.214	0.262	0.330	0.298	0.335	0.329
H12-0.29-3	0.000	0.118	0.165	0.205	0.191	0.210	0.228	0.278	0.284	0.303	0.356	0.408	0.411	0.446	0.427
H12-0.29-6	0.000	0.066	0.133	0.147	0.184	0.179	0.213	0.207	0.201	0.222	0.290	0.322	0.331	0.355	0.341
H12-0.29-9	0.000	0.085	0.144	0.150	0.187	0.191	0.240	0.238	0.238	0.272	0.366	0.447	0.443	0.490	0.488
H12-0.26-0	0.000	0.152	0.245	0.251	0.251	0.281	0.296	0.306	0.327	0.337	0.413	0.388	0.398	0.427	0.424
H12-0.26-3	0.000	0.128	0.217	0.219	0.249	0.262	0.300	0.282	0.281	0.293	0.350	0.412	0.437	0.455	0.437
H12-0.26-6	0.000	0.117	0.205	0.222	0.261	0.259	0.304	0.284	0.284	0.303	0.388	0.447	0.446	0.459	0.431
H12-0.26-9	0.000	0.105	0.201	0.214	0.220	0.256	0.279	0.304	0.333	0.346	0.427	0.436	0.459	0.486	0.504
HR12-0.26-9	0.000	0.154	0.167	0.173	0.178	0.237	0.226	0.253	0.288	0.259	0.314	0.356	0.362	0.387	0.403
HR12-0.26-3	0.000	0.138	0.169	0.167	0.175	0.224	0.206	0.231	0.253	0.245	0.299	0.345	0.337	0.356	0.385
H20-0.38-0	0.000	0.079	0.102	0.110	0.111	0.125	0.123	0.113	0.141	0.157	0.193	0.178	0.188	0.178	0.183
H20-0.38-3	0.000	0.075	0.066	0.085	0.098	0.097	0.087	0.102	0.110	0.119	0.211	0.150	0.169	0.185	0.198
H20-0.38-6	0.000	0.081	0.066	0.088	0.110	0.101	0.106	0.101	0.119	0.144	0.174	0.227	0.229	0.255	0.274
H20-0.38-9	0.000	0.079	0.112	0.125	0.124	0.133	0.150	0.142	0.177	0.184	0.230	0.297	0.308	0.316	0.318
H20-0.35-9	0.000	0.089	0.114	0.127	0.121	0.124	0.127	0.158	0.154	0.183	0.224	0.248	0.329	0.348	0.368
H20-0.32-3	0.000	0.167	0.213	0.213	0.223	0.234	0.231	0.285	0.303	0.302	0.337	0.348	0.447	0.447	0.446
H20-0.32-6	0.000	0.086	0.094	0.094	0.095	0.087	0.094	0.102	0.142	0.171	0.160	0.211	0.216	0.219	0.228
H20-0.32-9	0.000	0.092	0.104	0.102	0.119	0.108	0.110	0.119	0.175	0.172	0.207	0.247	0.259	0.272	0.281
H20-0.29-3	0.000	0.097	0.140	0.148	0.156	0.147	0.150	0.178	0.247	0.239	0.264	0.297	0.326	0.329	0.346
H20-0.29-6	0.000	0.119	0.187	0.192	0.206	0.200	0.203	0.255	0.288	0.305	0.339	0.396	0.402	0.418	0.452
H20-0.29-9	0.000	0.108	0.171	0.175	0.183	0.203	0.226	0.219	0.240	0.256	0.294	0.341	0.342	0.333	0.349
HR20-0.35-9	0.000	0.080	0.113	0.117	0.133	0.117	0.143	0.190	0.149	0.180	0.225	0.282	0.276	0.299	0.322
HR20-0.32-6	0.000	0.095	0.143	0.154	0.160	0.140	0.167	0.205	0.176	0.188	0.237	0.256	0.257	0.256	0.280
HR20-0.29-3	0.000	0.093	0.135	0.142	0.146	0.147	0.146	0.178	0.188	0.229	0.263	0.282	0.289	0.289	0.295
HR20-0.29-6	0.000	0.123	0.177	0.189	0.175	0.161	0.189	0.240	0.222	0.236	0.321	0.343	0.346	0.386	0.390



Tabla 6. Retracción hidráulica del hormigón (mm/m)

Mezcla número	Edad de secado (t-to) , días											
	0	1	4	7	14	21	28	56	90	112	173	224
H12-0.35-0	0.000	0.127	0.241	0.272	0.456	0.494	0.555	0.480	0.476	0.499	0.568	0.570
H12-0.35-3	0.000	0.082	0.197	0.309	0.446	0.486	0.531	0.421	0.564	0.537	0.587	0.560
H12-0.35-6	0.000	0.087	0.192	0.295	0.430	0.522	0.542	0.427	0.560	0.555	0.583	0.577
H12-0.35-9	0.000	0.118	0.249	0.313	0.459	0.505	0.568	0.551	0.608	0.625	0.530	0.552
H12-0.32-0	0.000	0.123	0.236	0.326	0.422	0.492	0.518	0.472	0.595	0.564	0.590	0.602
H12-0.32-3	0.000	0.123	0.254	0.333	0.474	0.510	0.553	0.531	0.575	0.533	0.575	0.572
H12-0.32-6	0.000	0.121	0.278	0.356	0.426	0.438	0.470	0.492	0.507	0.491	0.497	0.508
H12-0.32-9	0.000	0.098	0.288	0.374	0.449	0.486	0.505	0.553	0.520	0.512	0.511	0.524
H12-0.29-0	0.000	0.104	0.239	0.332	0.391	0.425	0.465	0.512	0.468	0.516	0.519	0.529
H12-0.29-3	0.000	0.124	0.301	0.371	0.418	0.442	0.475	0.520	0.482	0.472	0.459	0.464
H12-0.29-6	0.000	0.096	0.245	0.308	0.404	0.452	0.438	0.374	0.460	0.465	0.450	0.461
H12-0.29-9	0.000	0.081	0.226	0.261	0.352	0.404	0.340	0.285	0.314	0.328	0.293	0.291
H12-0.26-0	0.000	0.128	0.196	0.236	0.376	0.413	0.423	0.416	0.487	0.503	0.461	0.478
H12-0.26-3	0.000	0.093	0.211	0.247	0.352	0.371	0.374	0.337	0.343	0.340	0.316	0.347
H12-0.26-6	0.000	0.083	0.211	0.240	0.337	0.358	0.357	0.271	0.289	0.308	0.307	0.333
H12-0.26-9	0.000	0.138	0.218	0.252	0.392	0.400	0.411	0.376	0.394	0.390	0.400	0.392
HR12-0.26-9	0.000	0.066	0.175	0.257	0.287	0.331	0.365	0.323	0.395	0.410	0.434	0.401
HR12-0.26-3	0.000	0.079	0.173	0.257	0.329	0.363	0.350	0.339	0.386	0.404	0.423	0.406
H20-0.38-0	0.000	0.114	0.240	0.321	0.401	0.456	0.485	0.536	0.610	0.615	0.621	0.600
H20-0.38-3	0.000	0.089	0.205	0.282	0.381	0.409	0.438	0.393	0.514	0.522	0.533	0.528
H20-0.38-6	0.000	0.084	0.205	0.276	0.388	0.409	0.420	0.461	0.428	0.463	0.431	0.426
H20-0.38-9	0.000	0.067	0.193	0.259	0.337	0.368	0.398	0.427	0.387	0.392	0.377	0.361
H20-0.35-9	0.000	0.115	0.233	0.307	0.397	0.461	0.478	0.488	0.479	0.439	0.409	0.390
H20-0.32-3	0.000	0.117	0.228	0.290	0.347	0.373	0.425	0.436	0.428	0.389	0.396	0.386
H20-0.32-6	0.000	0.100	0.184	0.264	0.354	0.394	0.400	0.469	0.446	0.463	0.455	0.459
H20-0.32-9	0.000	0.150	0.164	0.243	0.330	0.383	0.397	0.419	0.400	0.411	0.404	0.407
H20-0.29-3	0.000	0.110	0.188	0.288	0.344	0.364	0.381	0.405	0.405	0.400	0.422	0.392
H20-0.29-6	0.000	0.095	0.167	0.270	0.300	0.358	0.331	0.360	0.333	0.361	0.360	0.328
H20-0.29-9	0.000	0.126	0.247	0.295	0.355	0.398	0.411	0.471	0.409	0.416	0.421	0.404
HR20-0.35-9	0.000	0.081	0.155	0.206	0.231	0.394	0.339	0.383	0.379	0.372	0.367	0.331
HR20-0.32-6	0.000	0.070	0.137	0.224	0.245	0.404	0.383	0.411	0.451	0.461	0.490	0.444
HR20-0.29-3	0.000	0.105	0.143	0.243	0.280	0.345	0.371	0.386	0.417	0.423	0.438	0.417
HR20-0.29-6	0.000	0.104	0.177	0.241	0.257	0.419	0.434	0.450	0.462	0.474	0.457	0.443



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resistencia cilíndrica a compresión del hormigón

Para modelar la resistencia a compresión del hormigón, en función de la dosificación y del tiempo, se propone integrar una ecuación del tipo $f_{c(t=t_1)}(T, WCM, MSCM)$, que relacione las variables de dosificación con la resistencia a una edad dada “ t_1 ”, con otra ecuación $g(t, t_1)$, que estime la evolución de la resistencia en el tiempo (Gaedicke, 2003). La edad “ t_1 ” puede ser la edad de la resistencia especificada u otra intermedia. Es así como la resistencia cilíndrica a compresión f_c para una edad “ t ” cualquiera, se puede definir como:

$$f_{c(t)} = g(t, t_1) * f_{c(t=t_1)}(T, WCM, MSCM) \quad (1)$$

Evolución de la resistencia a compresión en el tiempo

El primer paso para modelar esta ecuación consiste en calibrar el submodelo de evolución de la resistencia a compresión en el tiempo. La evolución de la resistencia a compresión en el tiempo se muestra en la Figura 1, y se puede ver que es de tipo hiperbólica (ACI 209, 1992):

$$f_{c(t)} = \frac{at^c}{(b+t^c)} * f_{c(t_1)} = g(t, t_1) * f_{c(t_1)} \quad (2)$$

y

$$g(t, t_1) \approx 1 \quad (3)$$

en que “a”, “b” y “c” son coeficientes a calibrar por mínimos cuadrados.

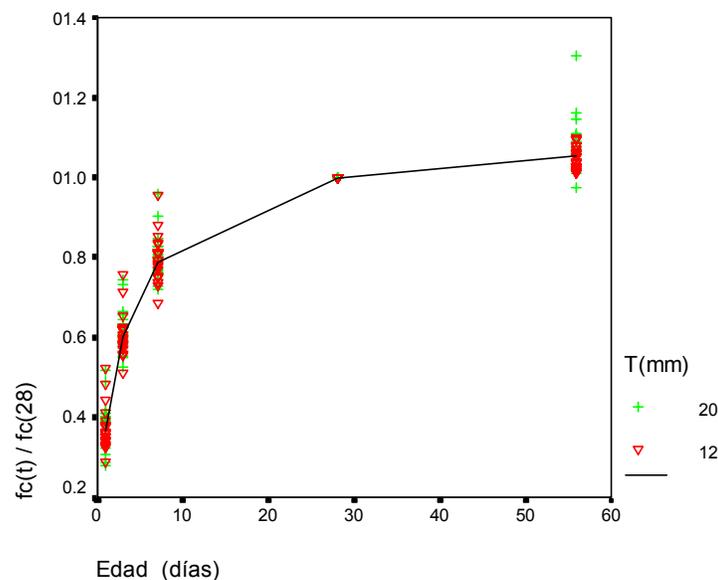


Figura 1. Evolución de la resistencia a compresión en el tiempo, representada como el cociente entre la resistencia a la edad dada t (f_{ct}) y la resistencia a 28 días (f_{c28}).

Para calibrar este submodelo se propone utilizar la edad $t_1 = 28$ días en vez de 56 días especificada para HPC, ya que ésta es la edad más comúnmente usada para especificar la resistencia del hormigón. Así, $t_1 = 28$ días, por lo que para calibrar la ecuación de evolución se reemplaza la función de resistencia $f_{c(t=t_1)}(T, WCM, MSCM)$ por la resistencia experimental obtenida a 28 días, “ f_{c28} ”. De esta forma:



$$\frac{f_{ct}}{f_{ct_1}} = \frac{f_{ct}}{f_{c28}} = g(t, t_1) = g(t, 28) \quad (4)$$

en que “ f_{ct} ” y “ f_{c28} ” son las resistencias a compresión medidas experimentalmente (ver Tabla 4).

Al calibrar esta ecuación mediante mínimos cuadrados se obtienen los coeficientes “ $a = 1,16$ ”, “ $b = 2,08$ ” y “ $c = 0,75$ ”. Este submodelo tiene un coeficiente de determinación de 0,96, con error estándar de la estimación de 4,1 MPa. La forma hiperbólica ajusta bien a los datos y posee un solo factor en el numerador, lo que reduce la cantidad de términos en la ecuación general que se busca determinar.

Efecto de las variables de dosificación en la resistencia

El siguiente paso consiste en modelar la resistencia a compresión en función de las variables de dosificación $f_{c(t=t_1)}(T, WCM, MSCM)$. La Figura 2 muestra el efecto del tamaño máximo (T), razón agua-cementante (WCM) y razón microsílíce-cementante (MSCM), sobre la resistencia a compresión a 28 días.

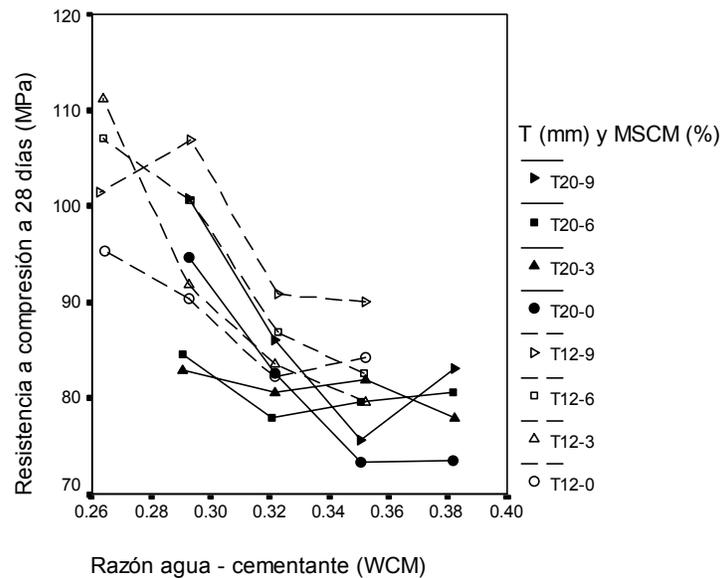


Figura 2. Efecto del tamaño máximo del árido (T), la razón agua-cementante (WCM) y la razón microsílíce-cementante (MSCM) en la resistencia a compresión a la edad de 28 días.

De la figura se observa que a menor tamaño máximo del árido, mayor es la resistencia a compresión para igual razón agua-cementante e igual razón microsílíce-cementante. Respecto al efecto de la razón WCM en la resistencia, se observa que en general se cumple la ley de Abrams (Neville, 1996) y que la resistencia aumenta a medida que disminuye la razón WCM. Por otra parte, se puede concluir también que el aumento de la dosis de microsílíce tiene mayor influencia en la resistencia de los hormigones con menor tamaño máximo del árido grueso, ya que la mayor superficie específica del árido de 12 mm mejora la eficiencia de la microsílíce al aumentar la superficie de adherencia entre el árido y la pasta.

Basándose en el análisis anterior se puede inferir que esta ecuación debería poseer un componente lineal para el efecto del tamaño máximo del árido (T) y un componente exponencial para el efecto de la razón agua-cementante (WCM) y razón microsílíce-cementante (MSCM). De esta forma se propone la siguiente ecuación:

$$f_{c(t=t_1)}(T, WCM, MSCM) = f_{c28} = d_0 * e^{(d_1 * WCM + d_2 * MSCM)} + d_3 * T \quad (5)$$

Este submodelo se calibra utilizando solamente los 40 resultados de resistencia a compresión medida a 28 días, obteniéndose los valores $d_0=169,38$, $d_1=-1,62$, $d_2=0,0048$ y $d_3 = -0,63$, respectivamente, con un coeficiente de determinación de 0,62 y un error estándar de la estimación de 6,6 MPa. El alto error estándar y bajo coeficiente de determinación de la ecuación (5) calibrada, indica claramente que éste no constituye el método óptimo para la calibración de la ecuación general de resistencia a compresión.



Por lo tanto, se propone emplear el método propuesto por Gaedicke (2003), que consiste en combinar las ecuaciones (2) y (5) para obtener un modelo general, de tipo no – lineal, de resistencia a compresión en función del tiempo y de las variables de dosificación, que permite realizar la calibración del modelo utilizando la totalidad de resultados medidos de resistencia a distintas edades del hormigón. Por lo tanto, combinando las ecuaciones antes mencionadas y considerando que el coeficiente “a” puede ser eliminado de la regresión ya que es dependiente de los coeficientes “d₀” y “d₃”, la ecuación se transforma en:

$$f_{c(t)} = \frac{t^c}{(b+t^c)} * [d_0' * e^{(d_1' * WCM + d_2' * MSCM)} + d_3' * T] \quad (6)$$

La ventaja de la ecuación propuesta (6), es que sus coeficientes son calibrados por mínimos cuadrados utilizando todos los resultados de resistencia a compresión medidos a distintas edades (200 en el caso de la presente investigación). La significancia de las variables se verifica al calcular el parámetro “t_e” para cada coeficiente (Visauta, 1999), utilizando la ecuación:

$$t_e = | \text{Valor estimado} / \text{Error estándar de estimación} | \quad (7)$$

en que “Valor estimado” corresponde al valor del coeficiente estimado asociado a una variable independiente y “Error estándar de estimación (E_{ec})”, corresponde al error estándar de estimación de dicho coeficiente. Se considera significativa la variable cuando su parámetro “t_e” calculado, es mayor o igual que el valor tabulado “t_{tab}” que se obtiene de las tablas de distribución-t de dos colas para los grados de libertad que corresponda (total de mediciones - cantidad de coeficientes estimados), y probabilidad 0,05. En este caso, para que una variable sea significativa y dado que se utilizan todas las mediciones de resistencia (200), el valor calculado “t_e” debe ser mayor o igual que el valor tabulado “t_{tab}” para 196 grados de libertad y probabilidad 0,05, que corresponde aproximadamente a t_{tab} ≈ 2,0.

En la Tabla 7 se presenta el análisis de los coeficientes calibrados del modelo general de resistencia, con su error estándar de estimación y parámetro “t_e”. El análisis se realizó para el modelo representado por la ecuación (6) original y dado que el resultado arrojó un valor del exponente “c = 0,785” muy similar al obtenido en la calibración del submodelo de evolución de la resistencia en el tiempo y al valor sugerido por ACI 209 (1992), también se realizó el análisis asumiendo un valor del exponente “c = 0,75”.

Tabla 7. Análisis de significancia de variables del modelo de resistencia a compresión

Variable	Coeficiente	Calibración de todos los coeficientes			Calibración asumiendo c = 0,75		
		Valor estimado	Error estándar	t _e	Valor estimado	Error estándar	t _e
tiempo	b	2,053	0,0635	32,3	2,051	0,064	32,3
-----	d ₀ '	204,89	9,04	22,7	207,99	8,63	24,1
tiempo	c	0,785	0,0372	21,1			
WCM	d ₁ '	-1,956	0,152	12,9	-1,956	0,152	12,9
MSCM	d ₂ '	0,00394	0,00137	2,9	0,00394	0,00137	2,9
T	d ₃ '	-0,745	0,136	5,8	-0,756	0,138	5,5
Error estándar estimación		5,0 MPa			5,0 MPa		
Coeficiente de determinación		R ² = 0.96			R ² = 0.96		

Es claro que todas las variables de la ecuación (6) son significativas, ya que t_e ≥ t_{tab} ≈ 2,0. Asimismo, es la edad del hormigón (t) la variable más significativa (mayor t_e), seguida por la razón agua-cementante (WCM), el tamaño máximo del árido (T) y finalmente por la razón microsilice-cementante (MSCM). El coeficiente asociado a WCM es



negativo, debido a que a mayor razón WCM menor es la resistencia. El tamaño máximo tiene asociado un coeficiente negativo, lo que coincide con lo establecido en ACI 211 (1993) que establece que en general para similar o igual tipo de pasta (dado por WCM y MSCM iguales), el árido de menor tamaño máximo permite obtener una mayor resistencia. El coeficiente asociado a MSCM es positivo, lo que implica que a mayor dosis de microsílíce mayor es la resistencia a compresión. Sin embargo, la razón MSCM resultó ser la variable menos significativa en la resistencia a compresión, lo que se corrobora con los resultados mostrados en la Figura 2 para la resistencia a 28 días. De esta forma, el modelo para HPC fabricados con Cemento Portland Siderúrgico corresponde a:

$$f_{c(t)} = \frac{t^{0,75}}{(2,05 + t^{0,75})} * [208 * e^{(-1,956 * WCM + 0,00394 * MSCM)} - 0,756 * T] \quad (8)$$

que incluye las variables estadísticamente significativas para la resistencia a compresión consideradas en el diseño experimental. El coeficiente de determinación ajustado es de 0,96 y el error estándar de la estimación es 5 MPa. La Figura 3 muestra la relación que existe entre la resistencia a compresión medida y la estimada por el modelo propuesto, y permite verificar que los resultados siguen una recta de pendiente cercana a 1, con poca dispersión de datos, lo que confirma que la ecuación desarrollada predice adecuadamente la resistencia a compresión. Al comparar el modelo general de resistencia a compresión calibrado con todos los resultados experimentales (ecuación 8), versus el submodelo calibrado solamente con resultados a 28 días (ecuación 5), se observa que existe una notoria mejora del error de estimación desde 6,6 a 5 MPa, lo que confirma las ventajas del método propuesto.

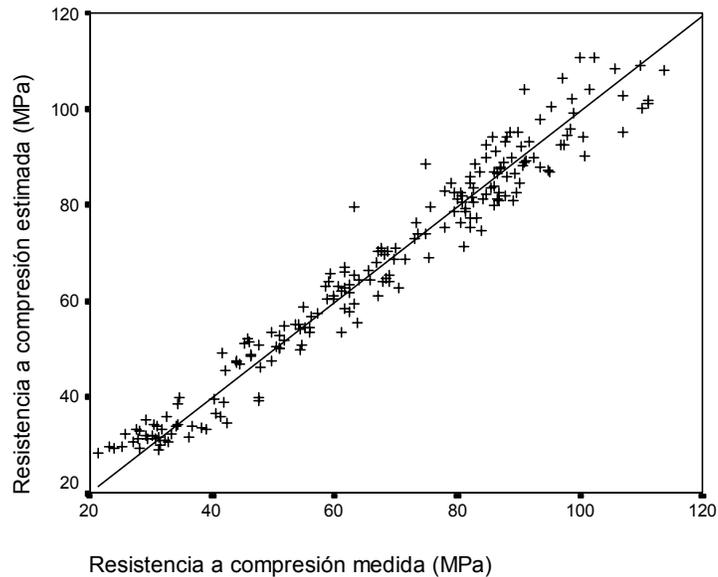


Figura 3. Relación entre la resistencia a compresión medida y estimada por el modelo general de resistencia a compresión (ecuación 8).

4.2 Módulo de elasticidad del hormigón

La comparación de la modelación del módulo de elasticidad en función de las variables independientes de dosificación y del tiempo, con la modelación en función de la variable dependiente resistencia a compresión, muestra que este último procedimiento es adecuado ya que implícitamente contiene las variables independientes utilizadas en el factorial del experimento y además requiere menor número de ensayos para obtener una calibración confiable. Este comportamiento se muestra en la Figura 4, que grafica la relación que existe entre el módulo de elasticidad y la resistencia cilíndrica a compresión, para todas las edades. Se observa claramente que el módulo de elasticidad del hormigón “ E_c ”, tiene una expresión del tipo (ACI 363, 1992):

$$E_c = a_1 + a_2 * f_c^{a_3} \quad (9)$$

en que “ a_1 ”, “ a_2 ” y “ a_3 ” son coeficientes calibrados y “ f_c ” es la resistencia cilíndrica a la compresión del hormigón.



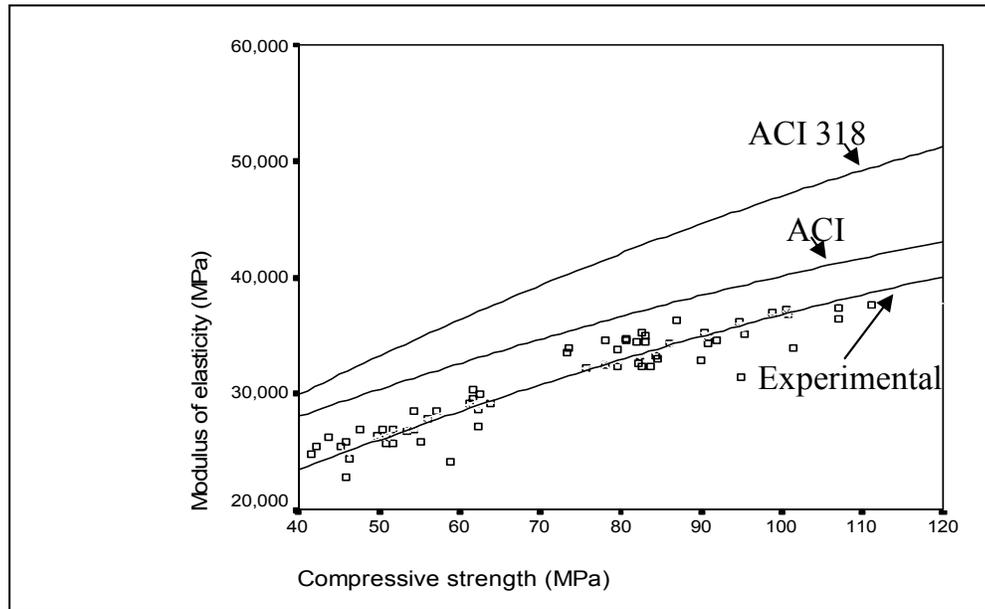


Figura 4. Relación entre el módulo de elasticidad y resistencia a compresión. Comparación entre la ecuación de módulo de elasticidad obtenida con resultados experimentales (ecuación 10) y las propuestas por ACI 363 (1992) y ACI 318 (2002).

Al calibrar la ecuación (9) se concluye que el coeficiente “a₁” no es significativo, por lo que la ecuación obtenida con los resultados experimentales corresponde a:

$$E_c = 3677 * \sqrt{f_c} \tag{10}$$

El coeficiente de determinación ajustado (por el origen) es de 0,998 y el error estándar de la estimación es de 1405 MPa.

Al comparar el modelo calibrado (10) con la ecuación para hormigones de alta resistencia propuesta por el ACI 363 (1992) y la ecuación para hormigones normales propuesta por ACI 318 (2002) presentadas a continuación,

$$\text{ACI 363: } E_c = 6900 + 3320 * \sqrt{f_c} \tag{11}$$

$$\text{ACI 318: } E_c = 4700 * \sqrt{f_c} \text{ para densidad del hormigón entre } 1500 \text{ y } 2500 \text{ kg/m}^3 \tag{12}$$

se observa que la ecuación experimental (10) tiene el mismo exponente de la resistencia a compresión y que estima un valor más bajo del módulo de elasticidad del hormigón que los modelos ACI 363 (1992) y ACI 318 (2002). Similar resultado ha sido obtenido en investigación anterior realizada con materiales locales (Videla, 1996). Además Videla y Aguilar (2001a), sugieren que este comportamiento probablemente podría deberse al tipo de árido utilizado, ya que han demostrado que hormigones fabricados con áridos calcáreos tienen mayor módulo de elasticidad que hormigones con árido silíceo.

4.3 Resistencia a la tracción por flexión del hormigón

Por las mismas razones que para el módulo de elasticidad, la modelación de la resistencia a la tracción por flexión se realizó respecto a la resistencia a compresión. La Figura 5 muestra la relación entre la resistencia a la tracción por flexión y la resistencia cilíndrica a compresión. Esta relación se puede definir como:

$$f_r = b_1 + b_2 * f_c^{b_3} \tag{13}$$

en que “b₁”, “b₂” y “b₃” son coeficientes calibrados, “f_c” es la resistencia a compresión y “f_r” es la resistencia a la tracción por flexión.

Al calibrar esta ecuación se obtiene que:

$$f_r = 0,117 * f_c \tag{14}$$



El coeficiente de determinación ajustado (en el origen) es de 0,990 y el error estándar de estimación es 0,72 MPa. Esta ecuación indica que la resistencia a la tracción por flexión corresponde aproximadamente a un 11,7% de la resistencia a la compresión. Para obtener esta ecuación se utilizaron resistencias a compresión y a flexotracción a distintas edades.

Cabe hacer notar que el exponente de la resistencia a compresión de la ecuación calibrada, es muy superior al exponente 0,5 propuesto por ACI 363 (1992) y de 2/3 por CEB-FIP (1993).

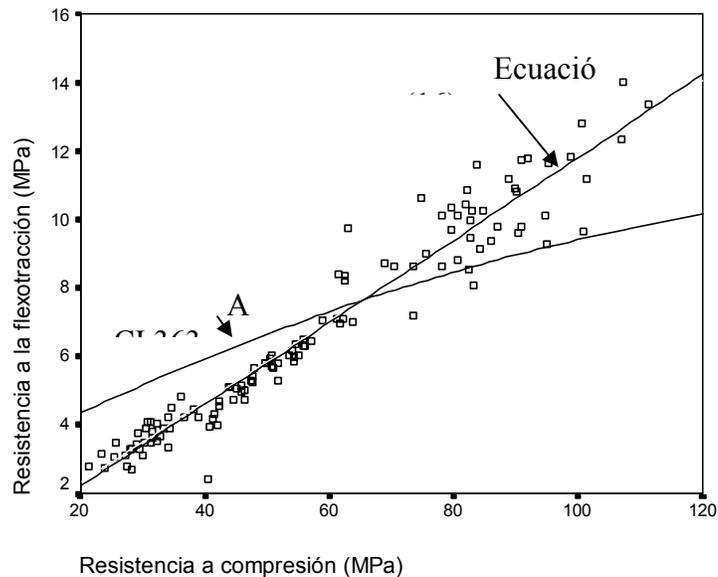


Figura 5. Relación entre resistencia a flexotracción y compresión. Comparación entre la ecuación de resistencia a tracción por flexión obtenida con resultados experimentales (ecuación 14) y la propuesta por ACI 363 (1992).

Finalmente se verificó la forma de la ecuación propuesta por ACI 363 (1992), que establece una relación entre la resistencia a tracción por flexión y la raíz cuadrada de la resistencia cilíndrica a la compresión, es decir $b_1 = 0$ y $b_3 = 0.5$. De esta manera se obtendría la siguiente ecuación calibrada:

$$f_t = 0,943 * f_c^{0,5} \quad (15)$$

que tiene un coeficiente de determinación ajustado (en el origen) de 0,953 y un error estándar de estimación de 1,593 MPa. Al comparar la ecuación desarrollada (14) y la ecuación calibrada basada en la raíz cuadrada de la resistencia cilíndrica a compresión (15), se puede observar que el error estándar de la segunda prácticamente duplica a la primera. Similar resultado se obtiene si se compara la ecuación propuesta (14) con la ecuación del CEB-FIP (CEB, 1993). Por tanto se puede concluir que la ecuación obtenida (14) estima mejor la resistencia a la tracción por flexión determinada experimentalmente, para los materiales utilizados en esta investigación.

4.4 Resistencia al desgaste del hormigón

Los resultados de las mediciones de desgaste no mostraron un comportamiento claro respecto del efecto de la razón agua-cementante y microsilíce-cementante. La única variable significativa fue el tamaño máximo del árido grueso. Asimismo, las réplicas de los hormigones dosificados presentan una diferencia promedio del 70% en la magnitud del desgaste respecto a los hormigones originales, lo que indica una baja reproducibilidad del ensayo. Estos resultados podrían hacer suponer que el método de medir la huella de desgaste no sería el más adecuado para caracterizar esta propiedad, y que el método de ensayo ASTM C 944 (ASTM, 1998b), en general no sería apropiado para controlar hormigones de alta resistencia.

Sin embargo, con los resultados obtenidos es posible establecer un criterio para recomendar el tamaño máximo a utilizar para obtener un desgaste dado. El diagrama de caja de la Figura 6 muestra la dispersión de los resultados para cada tamaño máximo, con la medición mínima y máxima en los extremos y el 50 % restante de los resultados en el rectángulo al centro. Dada la alta dispersión de resultados, se deduce que para obtener un desgaste no mayor que 0,451 mm es recomendable usar árido de tamaño máximo 12 mm. Este criterio se puede aplicar de manera similar si se desea un desgaste no mayor a 0,614 mm, para lo cual se recomienda utilizar árido de 20 mm.



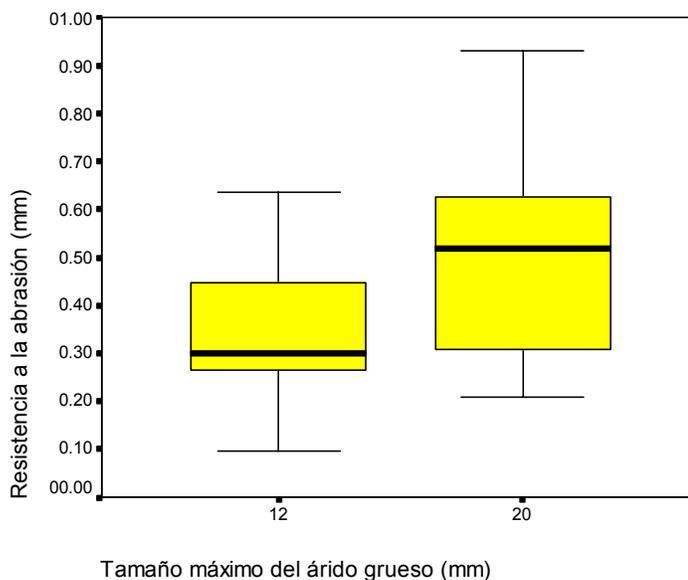


Figura 6. Efecto del tamaño máximo del árido grueso (T) en la resistencia al desgaste del hormigón a 28 días.

4.5 Retracción autógena e hidráulica del hormigón

La modelación de la retracción hidráulica de HPC requiere analizar por separado la retracción autógena e hidráulica. La necesidad de satisfacer este requerimiento queda comprobada al comparar la magnitud de ambos tipos de retracción, utilizando como referencia la retracción promedio medida a la edad de 231 días, que fue de 0,359 mm/m y 0,452 mm/m para la retracción autógena e hidráulica, respectivamente. Este resultado confirma la importancia de la retracción autógena en HPC, ya que a la edad de 231 días representa el 44,3% de la retracción total. Por lo tanto, se decidió realizar la modelación de la retracción calibrando un modelo como el FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000), que satisface dicha condición, y que además ha sido validado recientemente para HPC (Persson, 2001) y se ajusta al factorial de ensayos de esta investigación. Además, la metodología de calibración se basó en el procedimiento propuesto por Videla et al (2001).

Modelación de la retracción autógena del hormigón

FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000), define la retracción autógena en función de un submodelo de evolución de la retracción en el tiempo y de un submodelo de retracción última, del siguiente tipo:

$$\varepsilon_{as}(t) = f_0(t) * \varepsilon_{as\infty} \quad (16)$$

con: $f_0(t) = (1 - \exp(-a * t^b))$
(17)

y: $\varepsilon_{as\infty} = c * \left[\frac{\frac{f_{c28}}{10}}{(6 + \frac{f_{c28}}{10})} \right]^d$
(18)

en que “ $\varepsilon_{as}(t)$ ” es la retracción autógena a la edad de “t” días, “ $\varepsilon_{as\infty}$ ” es la retracción autógena última, $f_0(t)$ es el submodelo de evolución de la retracción autógena en el tiempo, “ f_{c28} ” es la resistencia a compresión del hormigón a 28 días y c es un coeficiente que depende del tipo de cemento (0,6 para el caso de la presente investigación). Además a, b y d son coeficientes fijos que toman los valores de -0,2, 0,5 y 2,5, respectivamente.

Para calibrar el submodelo de evolución de retracción autógena $f_0(t)$, se propone calibrar la siguiente ecuación que se obtiene de dividir la ecuación (16) por la última medición experimental (t = 231 días de edad del hormigón), es decir:



$$\frac{\varepsilon_{as}(t)}{\varepsilon_{as}(231)} = \frac{f_0(t) * \varepsilon_{as\infty}}{f_0(231) * \varepsilon_{as\infty}} = \frac{f_0(t)}{f_0(231)} = \left[\frac{(1 - \exp(-a * t^b))}{(1 - \exp(-a * (231)^b))} \right] \quad (19)$$

Esta ecuación permite calibrar el submodelo de evolución de la retracción en el tiempo “ $f_0(t)$ ”, ya que el cociente “ $\varepsilon_{as}(t) / \varepsilon_{as}(231)$ ” formado con las mediciones de retracción autógena a distintas edades “ $\varepsilon_{as}(t)$ ” y la última medición de retracción para cada hormigón “ $\varepsilon_{as}(231)$ ”, es conocido. Además, “a” y “b” son coeficientes a calibrar por mínimos cuadrados.

Al realizar dicha operación se obtiene que $a = 0,18$ y $b = 0,48$, con un error estándar de estimación 0,033 mm/m y un coeficiente de determinación ajustado 0,90. Sin embargo, estos valores son prácticamente iguales a los propuestos por FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000), que son $b = 0,2$ y $c = 0,5$. Además, al evaluar el modelo con los coeficientes originales se mantiene el error estándar de estimación y el coeficiente de determinación. Por lo tanto se concluye que es aceptable mantener los coeficientes originales de dicho submodelo, es decir:

$$\varepsilon_{as}(t) = (1 - \exp(-0,2 * t^{0,5})) * \varepsilon_{as\infty} \quad (20)$$

Una vez calibrado el submodelo de evolución de la retracción autógena en el tiempo, se debe calibrar la ecuación (18) para la retracción autógena última. Reemplazando el submodelo de retracción última en la ecuación (20) se obtiene que:

$$c * \left[\frac{\frac{f_{c28}}{10}}{(6 + \frac{f_{c28}}{10})} \right]^d = \frac{\varepsilon_{as}(t)}{(1 - \exp(-0,2 * t^{0,5}))} \quad (21)$$

Al calibrar esta ecuación utilizando las retracciones autógenas medidas a distintas edades “ $\varepsilon_{as}(t)$ ” y la resistencia cilíndrica a compresión a 28 días “ f_{c28} ”, para cada hormigón, y asumiendo que solo se determina el coeficiente relativo al tipo de cemento c (es decir, se mantiene el valor del exponente $d = 2,5$), se obtiene un coeficiente calibrado $c = 1,344$, con un error estándar 0,05 mm/m, un coeficiente de determinación ajustado 0,77 y un coeficiente de variación según CEB (CEB, 1993) y Bazant (Bazant y Baweja, 1995) de 22,1 y 21,1%, respectivamente. El valor del coeficiente “c” calibrado duplica el valor propuesto por el modelo FIB2000 (Müller y Kvitsel, 2000), para cemento de alta resistencia inicial ($c = 0,600$), lo que indica que el cemento portland siderúrgico utilizado en la investigación tiene mayor retracción autógena. De esta forma, la ecuación calibrada propuesta para predecir la retracción autógena $\varepsilon_{as}(t)$ en (mm/m) del hormigón de alto desempeño fabricado con cemento portland siderúrgico de alta resistencia inicial es:

$$\varepsilon_{as}(t) = (1 - \exp(-0,2 * t^{0,5})) * 1,344 * \left[\frac{f_{c28}}{(60 + f_{c28})} \right]^{2,5} \quad (22)$$



En la Figura 7 se muestra la relación entre la retracción autógena estimada por la ecuación (22) y la retracción autógena medida, y se verifica que el modelo entrega una predicción acertada de la retracción autógena.

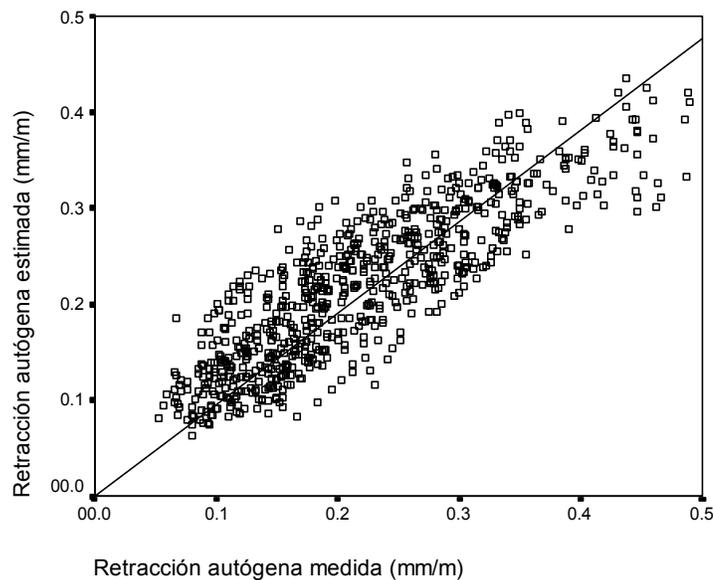


Figura 7. Comparación entre la retracción autógena medida y estimada por el modelo FIB 2000 calibrado (ecuación 22).

Modelación de la retracción hidráulica o por secado del hormigón

FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000), define la retracción hidráulica “ $\epsilon_{sh}(t, t_0)$ ” en función de un submodelo de evolución de retracción hidráulica en el tiempo “ $f_1(V/S, t, t_0)$ ”, un submodelo de humedad relativa “ $f_2(HR)$ ” y un submodelo de retracción hidráulica última “ $\epsilon_{sh\infty}$ ”, el que se expresa con una ecuación del siguiente tipo:

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = f_1(V/S, t, t_0) * f_2(HR) * \epsilon_{sh\infty} \quad (23)$$

con:

$$f_1(V/S, t, t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{e*(V/S)^2 + (t-t_0)} \right]^f \quad (24)$$

$$f_2(HR) = 1,55 * \left[1 - \left(\frac{HR}{100} \right)^3 \right] \quad (25)$$

y

$$\epsilon_{sh\infty} = 0,11 * (2 + g) * \exp\left(-h * \left(\frac{f_{c28}}{10}\right)\right) \quad (26)$$

en que “ $(t-t_0)$ ” es el tiempo de secado, t_0 es el tiempo de curado, V/S es la razón volumen/superficie, HR es la humedad relativa y “ f_{c28} ” es la resistencia cilíndrica a compresión del hormigón a 28 días, g y h son coeficientes que dependen del tipo de cemento (6 y 0,12 para el cemento usado en la presente investigación, respectivamente) y e es un coeficiente de calibración del efecto de la razón V/S sobre la función de evolución de retracción hidráulica. Además f es un exponente que actúa sobre la velocidad de desarrollo de la retracción hidráulica, usualmente asumido como 0,5 basado en la aplicación de la teoría de la difusión para modelar físicamente la pérdida de agua del hormigón.



En esta investigación se utilizó la humedad relativa estándar de la cámara de retracción ($50 \pm 4\%$). Por esta razón no se puede calibrar el submodelo de humedad relativa y se asume $f_2(HR) = 1,356$

A continuación se debe calibrar el submodelo de evolución de la retracción hidráulica en el tiempo. Considerando que se aplicó un solo tiempo de curado, $t_0 = 7$ días, que se usó un solo tipo de probeta prismática de dimensiones $75 \times 75 \times 285$ mm con una razón $V/S = 16,57$, sólo resta por calibrar el coeficiente “e” y el exponente “f”.

El procedimiento de calibración es el mismo que se utilizó para la retracción autógena, que se basa en calibrar la función utilizando las mediciones de retracción hidráulica a distintas edades y la última medición disponible (224 días de secado). Al calibrar esta ecuación se obtiene el coeficiente “e = 0,0126” y el exponente “f = 1,117” del submodelo, con un error estándar de estimación de 0.041 mm/m y un coeficiente de determinación ajustado de 0.94.

El resultado obtenido de la calibración muestra claramente que el submodelo de evolución de la retracción hidráulica en el tiempo propuesto por FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000), no reproduce adecuadamente el comportamiento de los hormigones fabricados con materiales locales. Por lo tanto, la única forma posible de mejorar la función del tiempo de la retracción hidráulica es modificando tanto el exponente (para cambiar la velocidad), como el denominador (para desplazar la curva), de la función del tiempo. Se concluye, por lo tanto, que la clase de cemento tiene un efecto significativo en la forma de la curva de evolución de la retracción, ya que para mayores tiempos de secado subestima el valor de la retracción medida. Iguales conclusiones se han alcanzado en otras investigaciones (Videla y Aguilar, 2001a; Videla y Aguilar, 2001b; Videla et al, 2001), realizadas con hormigones fabricados con cementos portland puzolánicos, las que sugieren que el exponente de la función del tiempo debería ser cercano a 1. Según Hanssen y Almudaiheem (1988), esto podría ser posible porque la teoría de la difusión, por si sola no, explica adecuadamente toda la fenomenología envuelta en la retracción hidráulica.

El último paso consiste en calibrar los coeficientes g y h del submodelo de retracción hidráulica última (ecuación 26), que dependen del tipo de cemento. Reemplazando los submodelos de evolución de retracción hidráulica en el tiempo y del efecto de la humedad relativa en la ecuación (23), se obtiene:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{0,0126 * (V/S)^2 + (t - t_0)} \right]^{1,117} * 1,356 * 0,11 * (2 + g) * \exp\left(-h * \left(\frac{f_{c28}}{10}\right)\right) \quad (27)$$

Luego, utilizando la retracción hidráulica medida a distintas edades “ $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ ” y la resistencia a compresión a 28 días “ f_{c28} ”, de cada hormigón, se calibra la ecuación (27), obteniéndose los valores $g = 2,39$ y $h = 0,0375$. El error estándar de estimación del modelo es 0,061 mm/m, el coeficiente de determinación ajustado es 0,86 y el coeficiente de variación según CEB (CEB, 1993) y Bazant (Bazant y Baweja, 1995) es de 19,0 y 18,2%, respectivamente, lo que se considera una buena estimación de la retracción hidráulica. El coeficiente “g” calibrado es inferior al propuesto por el modelo FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000) para cemento de alta resistencia inicial ($g = 6$). Asimismo, el coeficiente “h” calibrado es del orden de un tercio respecto del propuesto por FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000), para cemento de alta resistencia inicial ($h = 0,12$). Estos resultados indican que el modelo original FIB 2000 posee mayor sensibilidad al efecto de la resistencia a compresión del hormigón, en comparación al modelo calibrado. De esta forma, la ecuación calibrada para predecir la retracción hidráulica en (mm/m), del hormigón de alto desempeño fabricado con cemento portland siderúrgico de alta resistencia inicial es:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{0,0126(V/S)^2 + (t - t_0)} \right]^{1,117} * 1,55 * \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3 \right] * 0,11 * (2 + 2,39) * \exp\left(-0,0375 * \left(\frac{f_{c28}}{10}\right)\right) \quad (28)$$

La Figura 8 muestra la relación entre la retracción hidráulica estimada por la ecuación (28) y la retracción hidráulica medida. En la figura se puede verificar que la predicción podría considerarse aceptable.



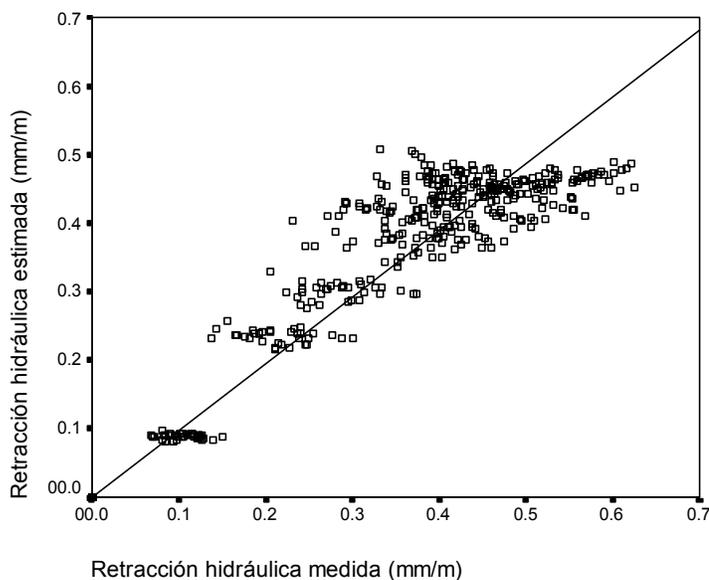


Figura 8. Comparación entre la retracción hidráulica medida y estimada por el modelo FIB 2000 calibrado (ecuación 28).

5. CONCLUSIONES

De la investigación realizada se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- a) La efectividad de la microsilíce en la resistencia cilíndrica a compresión del hormigón a edades iguales o superiores a 28 días, está relacionada con el tamaño máximo del árido utilizado; a menor tamaño máximo mayor es su efectividad. Este fenómeno se debe a que la microsilíce mejora la adherencia, efecto que se manifiesta mejor en áridos de mayor superficie específica. A edades tempranas el efecto es menos notorio porque la interfase no domina la resistencia.
- b) Definir el modelo general de resistencia a compresión del hormigón combinando un submodelo de evolución de resistencia y otro de resistencia en función de las variables de dosificación, permite ampliar su espacio de inferencia a distintas edades del hormigón y aumentar la cantidad de resultados a utilizar en la calibración, permitiendo un modelo mejor ajustado a los datos.
- c) Un submodelo de evolución de la resistencia a compresión del hormigón de tipo hiperbólico representa muy bien el comportamiento del hormigón en el tiempo. Por otra parte, un submodelo de resistencia a compresión de forma exponencial para la razón agua/cementante (WCM) y microsilíce/cementante (MSCM), y lineal para el tamaño máximo (T) representa adecuadamente el efecto de las variables de dosificación sobre la resistencia.
- d) Las variables de mayor significación en la resistencia a compresión del hormigón son: el tiempo, la razón agua-cementante (WCM), el tamaño máximo del árido grueso (T) y finalmente la razón microsilíce-cementante (MSCM).
- e) La forma de la ecuación del módulo de elasticidad propuesta por ACI 363 (1992) es consistente con los resultados experimentales, pero con distintos coeficientes. A igual resistencia a compresión del hormigón, los módulos de elasticidad obtenidos en la investigación son inferiores a los estimados por los modelos ACI 363 (1992) y ACI 318 (2002). Entre otras razones, la diferencia observada puede tener su origen en los materiales usados localmente (Videla, 1996).
- f) Una relación lineal entre la resistencia a tracción por flexión y compresión entrega una mejor aproximación a los datos experimentales, que la relación en función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión propuesta por ACI 363 (1992). Asimismo se concluye que la resistencia a tracción por flexión es un 11.7% de la resistencia a compresión.
- g) La variable más significativa en la magnitud de la resistencia al desgaste es el tamaño máximo del árido grueso. La conclusión estadísticamente demostrable, a pesar de la variabilidad del ensayo, es que a menor tamaño máximo del árido grueso, mayor es la resistencia al desgaste. Este comportamiento se debería a que el árido grueso de menor tamaño minimiza el área de mortero expuesta. Los resultados del ensayo de desgaste ASTM 944 (ASTM, 1998b) presentan gran dispersión y variabilidad, sugiriendo que este método no es adecuado para medir desgaste en hormigones de alta resistencia.



- h) La retracción autógena es significativa en HPC, ya que es del orden de un 44.3% de la retracción hidráulica total a los 231 días.
- i) Los resultados experimentales indican que la retracción autógena última de HPC fabricado con cemento portland siderúrgico de alta resistencia inicial es mayor que la estimada por el modelo FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000), pero que la curva de evolución es la misma.
- j) Para el caso de la retracción hidráulica, los hormigones fabricados con cemento portland siderúrgico de alta resistencia inicial resultaron menos sensibles a la variación de resistencia a compresión, que lo sugerido por el modelo FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000). Además los resultados indican que la teoría de la difusión, por si sola, no necesariamente explicaría adecuadamente toda la fenomenología envuelta en la retracción hidráulica, de modo que es posible que no haya un único exponente de la función del tiempo de la retracción hidráulica para reproducir el comportamiento real de un hormigón particular. Más aún, la razón V/S afecta tanto la función del tiempo como la microestructura del hormigón, particularmente para hormigones fabricados con cementos portland puzolánicos y siderúrgicos.
- k) Se verificó que las ecuaciones calibradas del modelo FIB 2000 (Müller y Kvitsel, 2000), son adecuadas para predecir la retracción total de HPC fabricado con cemento siderúrgico al menos hasta la edad de 1 año.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a DICTUC S.A. por su aporte en infraestructura, personal y equipos de laboratorio para la realización de esta investigación. Además se agradece a la empresa de cementos BIO BIO S.A.C.I., por la donación de materiales y aporte en personal técnico para la investigación.

REFERENCIAS

- ACI (1996), ACI TAC HPC Committee, "1996 Spring Meeting", American Concrete Institute, Detroit, , Michigan, USA.
- ACI 209 (1992), Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, Reapproved 1997, SP-76, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, pp. 193-300.
- ACI 211 (1993), Guide for Selecting Proportions for High – Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash, ACI Committee 211.4R-93, Reapproved 1998, American Concrete Institute, Detroit, USA.
- ACI 318 (2002), Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI Committee 318 – 2002, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA.
- ACI 363 (1992), State of the Art Report on High – Strength Concrete, ACI Committee 363 R92, Reapproved 1997, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA.
- ASTM (1998a), Annual Book of ASTM Standards, V.04.01 Cement and Mortar, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- ASTM (1998b), Annual Book of ASTM Standards, V.04.02 Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- BAZANT, Z.P. y BAWEJA, S. (1995), "Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage. 1. Statistics and Sensitivity", Materials and Structures, Vol. 28, pp. 415-430, Michigan, USA.
- CEB (1993), CEB-FIP Model Code for Concrete Structures 1990, CEB Bulletin d'Information, N° 213/214, Comité Euro-International du Béton, Thomas Telford, Londres, U.K.
- GAEDICKE, C. (2003), Metodología para la Modelación de Propiedades y Optimización de la Dosificación del Hormigón de Alto Desempeño", Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 142 pp.
- HANSSEN, W.I and ALMUDAIHEEM, J.A. (1988), Effect of Specimen Size and Shape on Drying Shrinkage of Concrete - Discussion 84-M16 from the Mach –April 1987, ACI Materials Journal, Proceedings V. 85, N° 1, Enero - Febrero, pp.63-67.
- INN (1968), Cemento. Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales, NCh. 148 Of.68, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- MÜLLER, H.S. y KVITSEL, V. (2000), Creep and Shrinkage Model for Normal Concrete and HPC – concept for a uniform code-type approach, Special Issue for RFGC – ACI Workshop, Paris 2000.
- NEVILLE, A.M. (1996), Properties of Concrete, John Wiley and Sons Inc., New York.



- PERSSON, B. (2001), Validation of Fédération International de Béton, FIB 2000, Model for Shrinkage in Normal and High - Performance Concrete, Concreep 6, Elsevier Science Ltd, England, pp. 741-746.
- VIDELA, C. (1996), Retracción Hidráulica y Propiedades Mecánicas de Hormigones Chilenos, Informe de Investigación para Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, Santiago, Chile, 62 pp.
- VIDELA, C., and AGUILAR, C. (2001a), Effects of Mix Design Parameters on Drying Shrinkage of Concrete, 2001 Second International Conference on Engineering Materials, Nagataki, S., Al-Manaseer, A. and Sakata, K. (ed.), Vol. II, California, EEUU, Agosto 2001, pp. 99-110.
- VIDELA, C., and AGUILAR, C. (2001b), Effectiveness of Admixtures on the Reduction of Drying Shrinkage of Concrete, Creative Systems in Structural and Construction Engineering, Singh (ed.), Balkena, pp. 413-418.
- VIDELA, C., COVARRUBIAS, J.P. y MASANA, C. (2001), Calibración de Modelos de Predicción de la Retracción Hidráulica de Hormigones Fabricados con Cementos Chilenos, Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 16, Nº1, Enero - Junio, pp. 4-16.
- VISAUTA, B. (1999) "Análisis estadístico con SPSS para Windows", Mc Graw – Hill, Madrid.

NOTACIÓN

A_{c28}	=	resistencia a la abrasión a la edad de 28 días (mm)
E_{ct}	=	módulo de elasticidad a cualquier edad t (MPa)
f_{ct}	=	resistencia cilíndrica a compresión a cualquier edad t (MPa)
f_{rt}	=	resistencia a la flexotracción a cualquier edad t (MPa)
HR	=	humedad relativa (%)
MSCM	=	razón microsilice/materiales cementicios (%)
T	=	tamaño máximo nominal del árido grueso (mm)
t	=	tiempo, representando la edad del hormigón (días)
t_1	=	edad de referencia para el modelo de evolución de resistencia a compresión (días)
t_0	=	edad cuando comienza el secado (días)
(t- t_0)	=	tiempo de secado (días)
V/S	=	razón volumen/superficie (mm)
WCM	=	razón agua/materiales cementicios
$\epsilon_{as}(t)$	=	retracción autógena a cualquier edad t (mm/m)
$\epsilon_{as\infty}$	=	retracción autógena última (mm/m)
$\epsilon_{sh}(t, t_0)$	=	retracción hidráulica a cualquier edad t (mm/m)
$\epsilon_{as\infty}$	=	retracción hidráulica última (mm/m)

Carlos Videla

Profesor Titular, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción.

Pontificia Universidad Católica de Chile

Jefe Proyecto Servicio de Calidad e Inspección Técnica CIT - DICTUC S.A.

Gerente Area Resistencia de Materiales, DICTUC S.A..

Santiago, Chile

Professor, Department of Construction Engineering and Management.

Pontificia Universidad Católica de Chile

Project Manager, Quality and Inspection Services CIT - DICTUC S.A.

Manager, Strength of Materials Area, DICTUC S.A.

Santiago, Chile

cvidela@ing.puc.cl

Cristián Gaedicke

Alumno Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción.

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Jefe de Sección Investigación, Desarrollo y Calidad

Area Resistencia de Materiales, DICTUC S.A.

Santiago, Chile

MSc Student in Engineering Sciences, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción.



*Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
Section Chief of Research, Development and Quality
Strength of Materials Area, DICTUC S.A.
Santiago, Chile
cgaedick@ing.puc.cl*

