

Efecto del secado en ambiente de servicio en la evolución de las propiedades mecánicas de hormigones livianos estructurales

Effect of drying under service environment on the mechanical properties of structural lightweight concretes

Carlos Videla*, Patricio Tapia**

* Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, CHILE

** Cade-Idepe Ingeniería de Consulta, CHILE
ptapia@cadeidepe.cl

Fecha de recepción: 01/04/2007
Fecha de aceptación: 20/07/2007
PAG. 123 - 137

Resumen

En este trabajo se evalúa el efecto de la humedad relativa del ambiente de servicio en las resistencias a compresión y a tracción y en el módulo de elasticidad de hormigones livianos estructurales. Además se establecen relaciones que permiten estimar estas propiedades en función de la humedad relativa del ambiente y del tiempo de secado. Los hormigones se fabricaron con dos tipos de áridos gruesos livianos, piedra pómez y pellets de ceniza volante, y con un árido fino de densidad normal. Los hormigones se sometieron a dos condiciones ambientales de servicio: una a 90% de humedad relativa y otra a 90% de humedad relativa durante los 7 primeros días y luego a 50% de humedad relativa hasta la edad de ensayo. Los ensayos se efectuaron a 7, 28, 60 y 90 días de edad. Se observó un deterioro importante de las propiedades medidas por efecto de las condiciones de secado; a 83 días de secado, en promedio las pérdidas de resistencia a tracción y compresión fueron de 20% y 15%, respectivamente, y de módulo de elasticidad de 40% respecto a hormigones a 90% de humedad relativa. Se concluye que hay dos variables principales que regulan el efecto del secado en el hormigón liviano. La primera de éstas corresponde a razón agua-cemento y que define entre otras cosas la permeabilidad de la fase resistente. La otra variable corresponde al contenido relativo de árido liviano en la mezcla.

Palabras Clave: Hormigón liviano, piedra pómez, pellets cenizas volantes, secado, módulo de elasticidad, resistencia a compresión, resistencia a tracción

Abstract

In this paper the effect of the ambient relative humidity at service on the compressive and splitting strengths and in the modulus of elasticity of structural lightweight concretes is evaluated. Also, relationships are proposed allowing estimating these properties as a function of the ambient relative humidity and drying time. The concretes were made with two types of coarse lightweight aggregates, pumice and fly ash pellets, and with normal density fine aggregate. The concretes were subjected to two different environmental service conditions: 90% relative humidity and curing at 90% relative humidity during the first seven days and then to 50% relative humidity until the age of testing. The samples were tested at 7, 28, 60 and 90 days of age. An important deterioration of the measured properties due to the effect of the drying conditions was observed; at 83 days of drying, the compressive and splitting strength losses were on average of 20% and 15%, respectively, and of the modulus of elasticity of 40% with respect to concretes at 90% relative humidity. It was concluded that there are two main variables that can explain the loss of strength of lightweight concrete due to the effect of a dry environment. The first of them is the water-cement ratio which controls, among others, the permeability of the mortar or resistant phase. The second one is the relative content of lightweight aggregate in the concrete.

Keywords: lightweight concrete, pumice, fly ash pellets, drying, modulus of elasticity, compressive strength, splitting strength

1. Introducción

El comité ACI 213 (1999), define al hormigón liviano estructural como aquél hormigón con una densidad menor que 1850 kg/m³ y resistencia superior a 17.2 MPa. La presente investigación se ha centrado en el estudio de hormigones livianos estructurales fabricados a partir del reemplazo de la fracción gruesa del árido de densidad

normal, por un árido más poroso, menos denso y en general de menor resistencia. Este árido grueso constituye la fase liviana de este tipo de hormigones livianos. Por su parte el mortero, entendido como la mezcla de cemento, arena normal y agua pasa a ser la fase resistente del hormigón liviano (López, 1999). Por lo anterior, es



claro que las propiedades resistentes de este tipo de hormigones quedan limitadas por las propiedades resistentes del árido.

Adicionalmente a las propiedades intrínsecas del árido, las propiedades del hormigón, a una determinada edad, están fuertemente controladas por las condiciones ambientales a las que ha sido expuesto (Clarke, 1993). Por lo tanto, la cuantificación del efecto del medio ambiente de servicio es relevante al momento de predecir el comportamiento futuro de una determinada obra de hormigón.

En consecuencia, el objetivo principal de esta investigación es determinar la influencia de la humedad relativa del ambiente de servicio sobre la evolución de las propiedades resistentes de los hormigones livianos estudiados. Para ello distintas mezclas se exponen a dos condiciones de humedad relativa, caracterizándose sus propiedades, y a partir de los resultados se pretende derivar relaciones que permitan predecir el efecto de la humedad relativa respecto de las propiedades medidas en condición estándar.

2. Programa experimental

El programa experimental consideró obtener hormigones livianos estructurales (requerimiento de densidad y resistencia), con una trabajabilidad equivalente a un asentamiento de cono de Abrahms de 100 mm y sin el uso de aditivos. Con estas cuatro características se procedió a definir la dosificación de la fase resistente, la

proporción en volumen de la fase liviana y el contenido mínimo de agua en la mezcla.

Para la fase liviana se usó un árido de origen natural, consistente en piedra pómez de Arica, y otros de origen artificial correspondientes a pellets de ceniza volante fabricados con dos formulaciones distintas (pellets 1 y 2), según procedimiento propuesto por Videla y Martínez (Videla y Martínez, 2002; Martínez, 2003). Finalmente, el estudio también consideró evaluar las propiedades de un hormigón normal, usado como patrón, dosificado de manera de alcanzar una resistencia a los 28 días de edad equivalente al promedio de las resistencias a dicha edad de los hormigones livianos ensayados.

2.1 Materiales

En la preparación de las amasadas se usó un cemento Portland Puzolánico del tipo "Alta Resistencia Inicial - ARI". Además se consideró el uso de una arena normalizada y los cuatro tipos de áridos grueso ya indicados, cuyas propiedades se presentan en la Tabla 1. La caracterización de los áridos se realizó complementando los ensayos típicos de densidad, absorción y granulometría, con los ensayos de la norma inglesa BS-8112 (British Standards Institute, 1975), que permiten cuantificar la resistencia intrínseca de los áridos a través del ACV (valor de trituración del árido) y TPFV (valor del 10% de finos). El ACV entrega el porcentaje de trituración del árido que ha sido sometido a una carga creciente por espacio de 10 minutos y el TPFV indica que valor de carga produce la trituración del 10% de la muestra del árido al cabo de 10 minutos de ensayo.

Tabla 1. Propiedades de los áridos

Tipo de árido	P. Pómez Arica	Pellets Ceniza 1	Pellets Ceniza 2	Gravilla Normal	Arena Normal La Junta
Malla (mm)	Granulometría				
40	100	100	100	100	100
20	91	99	92	99	100
12.5	66	80	50	72	100
10	44	51	36	35	100
5	19	4	8	2	100
2.5	5	2	6	1	86
1.25	2	2	6	1	74
0.63	1	1	5	0	43
0.315	1	1	5	0	16
0.16	1	0	4	0	3
% Finos	20.21	0.00	0	0.27	2.34
Módulo Finura	6.38	6.39	6.37	6.63	2.78
Propiedades Físicas					
Drsss (Kg/m ³)	1246	1716	1575	2675	2662
Dseca (Kg/m ³)	905	1279	1130	2646	2625
Dacs (Kg/m ³)	558	800	789	1559	1693
Dass (Kg/m ³)	523	767	676	1487	1514
Absorción (%)	37.7	34.2	39.4	1.09	1.39
Huecos (%)	55.1	53.4	49.9	41.7	35.2
TPFV (Kn)	27.3	13.3	3.8		
ACV (%)	74.8	54.4	56.3		
IRA (Kn/cm ²)(kg/m ³)	11.3	12.3	15.0		



El valor IRA de la Tabla 1 corresponde a un “Índice de Resistencia del Árido”, parámetro definido en esta investigación como medida de la calidad de un árido (Tapia, 2004), de acuerdo a la formulación de la Ecuación 1:

$$IRA = \frac{\Delta Carga}{\Delta Descenso} \cdot 0,001 \cdot D_{r_{SSS}} \quad (1)$$

donde:

$D_{r_{SSS}}$: Densidad real del árido en condición saturado superficie seca, en kg/m^3 .

$\Delta Carga$: Diferencia entre la carga máxima y mínima en la zona de deformación de la curva carga – descenso. Para los áridos estudiados estos valores corresponden a 25 kN y 5 kN, respectivamente.

$\Delta Descenso$: Diferencia entre el descenso del émbolo en el ensayo de trituración producido por la carga máxima y el producido por la carga mínima en la zona de deformación de la curva carga-descenso, es decir, en este caso para las cargas de 25 kN y 5 kN, expresado en cm.

Este estimador de la calidad del árido liviano correlacionó mejor con el comportamiento de los hormigones, que el parámetro TPFV típicamente usado y recomendado por la norma inglesa.

2.2 Dosificaciones y factorial de ensayos

La dosificación de las mezclas se efectuó considerando el objetivo de obtener hormigones livianos estructurales (densidad menor que $1850 kg/m^3$ y resistencia superior a 17.2 MPa), con asentamiento de cono de Abrams de 100 mm y sin el uso de aditivos.

La definición de algunos parámetros de la dosificación se basó en una investigación desarrollada previamente por Videla y López (López, 1999; Videla y López, 2000), en el tema de dosificación de hormigones livianos. Se fijaron dos razones agua–cemento a usar: 0.35 y 0.40, y las proporciones en volumen de árido liviano en la mezcla en 35% y 45%. Por otra parte, a través de ensayos previos se determinó que la dosis mínima de agua en la mezcla necesaria para alcanzar la trabajabilidad objetivo es de 210 litros/ m^3 .

La Tabla 2 muestra las dosificaciones de los hormigones y morteros estudiados. En esta tabla se usa la simbología “M”, “HL” y “HN” para indicar mortero, hormigón liviano y hormigón de densidad normal, respectivamente. El índice que sigue en la nomenclatura señala el tipo de árido, tal que “A” indica piedra pómez de Arica y “P” indica pellets de ceniza volante. Los índices siguientes de la nomenclatura corresponden a la razón agua–cemento, en peso, de la fase soportante y al porcentaje, en volumen absoluto, del árido grueso en la mezcla, es decir de árido liviano o gravilla normal para hormigón liviano o de densidad normal, respectivamente.

Tabla 2. Dosificaciones sss de los hormigones de prueba (kg/m^3)

Hormigón	Dosificación				Densidad teórica	Propiedades Hormigón Fresco		
	C	W	A _G	A _F		γ	Cono (mm)	% Aire
M / 0.35	1087	381	0	626	2094	2132	140	2.2
M / 0.40	965	386	0	752	2103	2131	225	1.0
HLA / 0.35 / 45	597	212	548	341	1698	1752	77	2.1
HLA / 0.35 / 35	707	251	427	400	1785	1838	85	2.0
HLA / 0.40 / 45	530	215	548	406	1699	1765	105	1.5
HLA / 0.40 / 35	627	251	427	485	1791	1829	138	1.4
HLP1 / 0.35 / 45	599	210	758	344	1911	1895	25	2.0
HLP1 / 0.35 / 35	708	248	590	407	1953	1983	90	2.0
HLP1 / 0.40 / 45	531	212	757	414	1913	1932	70	1.5
HLP1 / 0.40 / 35	629	252	691	490	2062	1957	165	1.0
HLP2 / 0.35 / 45	599	209	697	340	1845	1919	43	2.1
HLP2 / 0.35 / 35	709	249	540	402	1900	1957	110	2.1
HLP2 / 0.40 / 45	532	212	696	409	1849	1907	98	1.4
HLP2 / 0.40 / 35	628	252	540	484	1904	1954	173	1.2
HN / 0.73 / 37	285	209	1000	817	2311	2342	77	1.2

C: Cemento, W: Agua, A_G: Árido grueso, A_F: Árido fino, γ densidad del hormigón

En estado fresco el hormigón se caracterizó por varios ensayos, entre los que destacan las mediciones del asentamiento del cono de Abrams (ASTM C143, 1990), densidad fresca del hormigón (ASTM C567, 1999) y determinación del volumen de aire en la mezcla mediante el método volumétrico (ASTM C173, 1994). En la Tabla 2 se han incluido también los resultados de los ensayos efectuados al hormigón fresco.

En estado endurecido se realizaron ensayos de resistencia a compresión (ASTM C39, 1986), módulo de elasticidad (ASTM C469, 1994) y tracción por hendimiento (ASTM C496, 1996) en probetas cilíndricas estándar a edades de 7, 28, 60 y 90 días. Del total de las probetas producidas en una amasada de hormigón, una parte se mantuvo en condición de curado normalizado ($\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ y $\text{HR} > 90\%$) y otra parte se sometió a un curado normalizado durante los 7 primeros días de edad y luego llevadas una condición de curado en ambiente seco ($\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ y $50\% \text{HR}$).

La Tabla 3 ilustra el factorial del experimento diseñado para esta investigación. En esta tabla las dos primeras columnas corresponden a los morteros y el número entre paréntesis en las celda del factorial

indica la cantidad de probetas ensayadas en cada caso.

3. Presentación y análisis de los resultados

La Tabla 4 resume el promedio de los resultados de resistencias a compresión y hendimiento y de módulo de elasticidad medidos en los ensayos de los hormigones en estado endurecido, ejecutados según el factorial presentado en la sección anterior.

Al revisar la tabla 4 se pueden notar algunos hechos relevantes:

- Como era de esperarse, la propiedad medida del hormigón sometido a secado es siempre menor a la propiedad medida en condición de curado estándar.
- La propiedad más afectada por el secado es el módulo de elasticidad.
- Hay mayor pérdida de peso o densidad en los hormigones livianos que en los de densidad normal. Además se nota que la pérdida de densidad en los primeros es similar para todas las muestras ensayadas.

Tabla 3. Factorial de ensayos de hormigones y morteros

Tipo de cemento	Portland Pozolánico ARI																										
Tamaño máximo del árido	20 mm																										
Tipo de árido grueso	----				Piedra pómez Arica				Pellets ceniza 1				Pellets ceniza 2				Gravilla										
Razón agua - cemento	0,35		0,40		0,35		0,40		0,35		0,40		0,35		0,40		0,73										
Proporción árido grueso (% vol)	---		---		45	35	45	35	45	35	45	35	45	35	45	35	---										
Humedad relativa (%)	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90									
Resistencia a compresión																											
Rc - 7 días	(4)	(4)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)					(3)								
Rc - 28 días	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(3)	(3)	
Rc - 60 días	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(3)	(1)	(3)	(1)	(3)	(1)	(3)	(3)	
Rc - 90 días	(2)	(2)	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)								(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	
Módulo elasticidad																											
Mc - 7 días	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)												(2)	
Mc - 28 días	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
Mc - 60 días	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(2)	(2)
Mc - 90 días	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)								(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
Resistencia de hendimiento																											
Rh - 7 días	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)												(2)	
Rh - 28 días	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)				(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
Rh - 60 días	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)



Tabla 4. Resultados de ensayos de resistencia y módulo de elasticidad del hormigón endurecido

Tipo de mezcla	Mortero				Hormigón HLA							
Razón agua cemento	0,35		0,40		0,35				0,40			
Porcentaje árido grueso (% vol)	---		---		45		35		45		35	
Humedad relativa (%)	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50
Densidad (kg/m ³)												
Dc - 7 días	2125	2125	2110	2110	1804	1804	1892	1892	1757	1757	1889	1889
Dc - 28 días	2164	2116	2044	1993	1771	1705	1868	1826	1759	1672	1820	1773
Dc - 60 días	2147	2113	2118	2075	1763	1666	1864	1753	1741	1626	1823	1758
Dc - 90 días	2155	2100	2156	2070	1727	1649	1834	1730	1743	1619	1799	1720
Resistencia a compresión (MPa)												
Rc - 7 días	66.9	66.9	58.7	58.7	21.3	21.3	26.6	26.6	20.9	20.9	25.8	25.8
Rc - 28 días	71.3	68.6	67.8	61.9	23.9	22.3	28.2	27.3	24.6	22.1	26.2	25.3
Rc - 60 días	83.8	83.5	78.7	73.9	25.5	22.2	27.5	24	24.9	22.1	28.4	27.8
Rc - 90 días	101.4	84.7	91.9	77.2	25.3	24.6	30.5	26.2	24.4	21	26.5	23.3
Módulo elasticidad (MPa)												
Mc - 7 días	18443	18443	15647	15647	11725	11725	13198	13198	10996	10996	13235	13235
Mc - 28 días	23677	18036	21335	16960	12643	10126	15178	12765	12793	8533	13739	10080
Mc - 60 días	24529	18275	23471	17531	13620	7195	15280	7840	12524	7280	11581	8878
Mc - 90 días	25667	20111	24714	17522	13048	7251	15844	8242	12713	6859	14729	8455
Resistencia de hendimiento (MPa)												
Rh - 7 días	2.9	2.9	2.9	2.9	1.4	1.4	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1
Rh - 28 días	4.5	2.0	29.0	2.5	1.6	0.9	2.5	2.3	1.4	1.1	2.0	1.6
Rh - 60 días	4.2	2.5	5.2	2.7	2.1	1.7	2.4	1.9	2.6	2.1	1.9	1.9
Rh - 90 días	5.7	3.0	4.4	3.0	1.8	1.4	1.9	1.7	2.1	1.9	1.8	2.0

Tabla 4. (continuación): Resultados de ensayos de resistencia y módulo de elasticidad del hormigón endurecido

Tipo de mezcla	Hormigón HLP1								Hormigón HLP2								Hormigón HN	
Razón agua cemento	0,35				0,40				0,35				0,40				0,73	
Porcentaje árido grueso (% vol)	45		35		45		35		45		35		45		35		---	
Humedad relativa (%)	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50
Densidad (kg/m ³)																		
Dc - 7 días	1933	1933	1982	1982	1939	1939	1949	1949									2332	2332
Dc - 28 días	1869	1807	1973	1907	1949	1820	1971	1865	1899	1800	1936	1886	1870	1763	1925	1864	2342	2252
Dc - 60 días	1906	1757	1955	1879	1945	1803	1965	1836	1872	1796	1930	1849	1889	1725	1938	1843	2369	2274
Dc - 90 días									1899	1765	1927	1846	1878	1727	1924	1805	2366	2268
Resistencia a compresión (MPa)																		
Rc - 7 días	18.9	18.9	23.8	23.8	21	21	24.7	24.7									26.7	26.7
Rc - 28 días	22.7	22.9	30.8	32.8	25.9	25.8	32.2	30.4	27.6	25	30.5	30.7	26.3	25	25.5	30.4	34.7	29.8
Rc - 60 días	26.3		34.4		28.8		35.2		29.9	28.7	33.3	33.8	29	26.1	33.4	32.7	35.6	34.2
Rc - 90 días									31.1	28.5	35.4	31.2	32.1	26.4	33.9	31	38.9	32.7
Módulo elasticidad (MPa)																		
Mc - 7 días	10005	10005	12833	12833	10972	10972	11262	11262									19037	19037
Mc - 28 días	11413	7689	14018	8792	13135	8123	13398	8505	12615	7495	13679	9099	10708	8289	12197	9573	22307	17653
Mc - 60 días	13435		16612		13231		151134		13370	8233	14479	9878	12813	8473	15008	9482	23561	19924
Mc - 90 días									14092	8346	14134	8893	13119	8115	14117	9232	24214	18284
Resistencia de hendimiento (MPa)																		
Rh - 7 días	1.4	1.4	1.6	1.6	1.7	1.7	2.1	2.1									1.9	1.9
Rh - 28 días									1.5	1.2	1.3	1.9	1.5	1.6	1.7	2.3	2.4	1.7
Rh - 60 días		1.4	2.4		1.5		2.5		2.0		2.5		1.9		2.1		3.0	2.7
Rh - 90 días									2.4	1.6	2.1	2.3	2.0	2.2	2.7	2.2	3.0	2.6

La investigación permite evaluar el efecto de 4 variables principales, en la pérdida de las propiedades mecánicas y elásticas del material. Estas variables son razón agua-cemento, porcentaje de árido liviano en la mezcla, resistencia del árido liviano, representada por el parámetro IRA, y la edad o el tiempo de permanencia de la probeta en la cámara de secado. En el caso de los hormigones de densidad normal, sin embargo, la información es limitada y sólo permite evaluar la influencia del tiempo de permanencia en la cámara de secado.

En los análisis que siguen, la notación usada es la siguiente:

- $f_{c(t)}^{HR}$ = Resistencia cilíndrica a compresión del hormigón sometido a un ambiente de servicio con una humedad relativa "HR" y medida a la edad de "t" días. Si no se especifica la humedad relativa, significa que el hormigón ha sido sometido a una condición de curado estándar ($HR \geq 90\%$ y $T = \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$).
- $f_{c(28)}$ = Resistencia cilíndrica a compresión del hormigón medida bajo condición de curado estándar y a 28 días de edad.
- $E_{c(t)}^{HR}$ = Módulo de elasticidad del hormigón sometido a un ambiente de servicio con una humedad relativa "HR" y medida a la edad de "t" días.
- $E_{c(28)}$ = Módulo de elasticidad del hormigón medido bajo condición de curado estándar y a 28 días de edad.
- $f_{h(t)}^{HR}$ = Resistencia a hendimiento del hormigón sometido a un ambiente de servicio con una humedad relativa "HR" y medida a una edad "t" días.
- $f_{h(28)}$ = Resistencia a hendimiento del hormigón medida bajo condición de curado estándar y a 28 días de edad.
- $t-t_0$ = Tiempo de secado o de permanencia del hormigón en un ambiente de servicio con baja humedad relativa. En caso que la probeta se haya mantenido en cámara húmeda $t_0=t$. En todo el resto de los casos $t_0=7$ días.

3.1 Efecto del secado sobre la resistencia a compresión del hormigón

En primer lugar se revisa el efecto de la razón agua-cemento en la resistencia a compresión del hormigón. La Figura 1 presenta la relación que se establece entre la

razón agua-cemento y el cociente entre la resistencia a compresión de un hormigón en cámara de secado y del mismo hormigón mantenido en cámara húmeda ($f_{c(t)}^{50}/f_{c(t)}$), a partir del comienzo del secado.

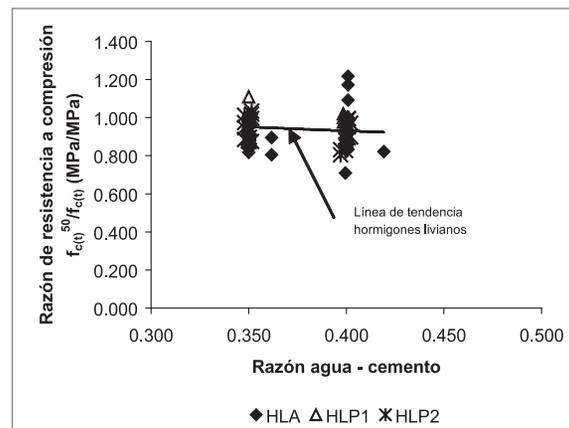


Figura 1. Razón de resistencia a compresión $f_{c(t)}^{50}/f_{c(t)}$ en función de la razón agua-cemento de hormigones livianos expuestos a secado

Tal como se puede notar en la Figura 1, existe una leve tendencia que indicaría que a mayor razón agua-cemento, es decir a menor resistencia de la fase soportante del hormigón liviano, mayor es el efecto del secado sobre la resistencia a compresión del hormigón liviano. Esto se debería a que el mortero menos resistente es a su vez más permeable y consecuentemente cede más fácilmente su humedad al ambiente, lo que potencia el deterioro causado por el secado, tal como queda ratificado al revisar la pérdida de densidad de los morteros en la Tabla 4.

Por su parte, a mayor porcentaje de árido liviano en la mezcla, mayor es la pérdida de resistencia del hormigón liviano, tal como se aprecia en la Figura 2, donde se presenta la relación entre la fracción en volumen de árido liviano en la mezcla de hormigón y la razón de resistencia a compresión $f_{c(t)}^{50}/f_{c(t)}$. El comportamiento observado se debería a que la menor cantidad de mortero, en la mezcla, vuelve al hormigón más débil por efecto del secado. Este resultado no concuerda con evidencia que señala que los hormigones livianos de alto desempeño experimentan un proceso de curado interno, generado por el aporte de agua contenida en los poros del árido liviano a la hidratación del cemento (Holms y Bremner,

2000). La diferencia de comportamiento radica en la gran impermeabilidad de la fase resistente de los hormigones de alto desempeño.

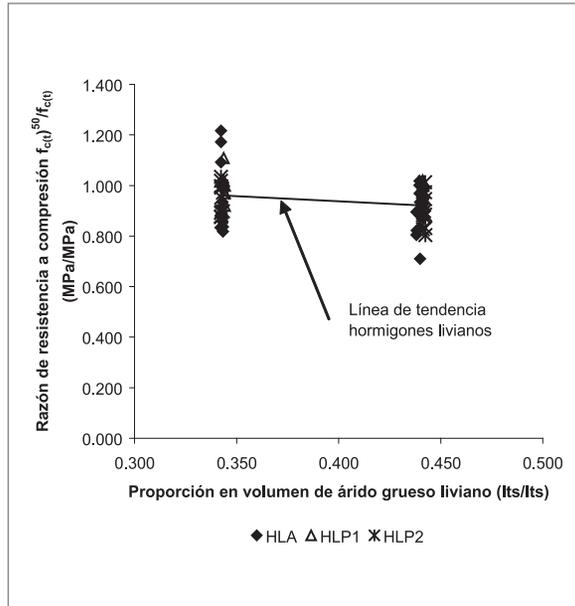


Figura 2. Relación entre la fracción en volumen absoluto de árido grueso liviano y la razón de resistencia a compresión $f_{c(t)}^{50}/f_{c(t)}$ de hormigones livianos expuestos a secado

En la Figura 3 se presenta la relación entre la calidad del árido, representada por su parámetro de resistencia IRA y el cociente entre la resistencia que alcanza un hormigón sometido a endurecimiento en cámara de secado, respecto de otro que se ha mantenido dentro de la cámara estándar hasta la fecha de ensayo, evaluado a igualdad de edad. Esta gráfica muestra que la calidad del árido liviano no constituye una variable relevante en el deterioro de la resistencia a compresión de los hormigones livianos sometidos a secado.

En consecuencia el efecto del secado sobre la resistencia a compresión de los hormigones livianos depende fundamentalmente del comportamiento de la fase resistente de la mezcla, o mortero, respecto del secado. La única influencia que ejerce el árido liviano es la dilución que hace del mortero en la mezcla de hormigón, es decir, a mayor dosis de árido liviano, menor es la cantidad de mortero, y mayor es la pérdida de resistencia del hormigón al quedar expuesto a un ambiente de secado.

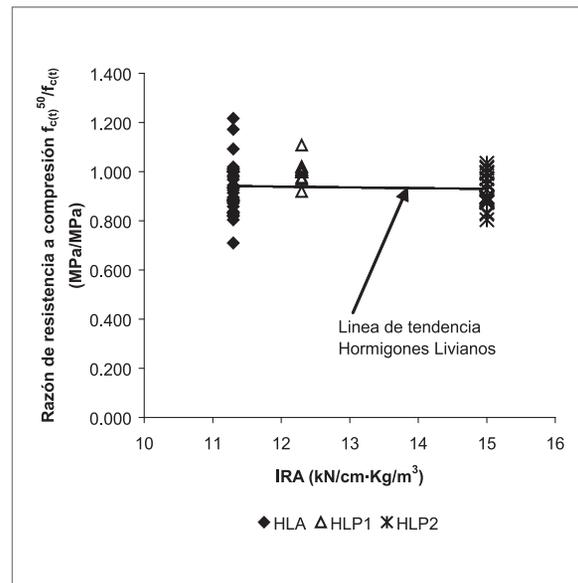


Figura 3. Relación entre la resistencia del árido liviano y la razón de resistencia a compresión $f_{c(t)}^{50}/f_{c(t)}$ de hormigones livianos expuestos a secado

Por último, la influencia del tiempo que el hormigón permanece en condición de secado se ilustra en la Figura 4. Como se puede notar en la Figura 4, el efecto de la exposición a un ambiente de secado sobre la resistencia a compresión del hormigón aumenta a mayor tiempo de exposición, y las curvas de pérdida porcentual de resistencia son similares para hormigones livianos y normales.

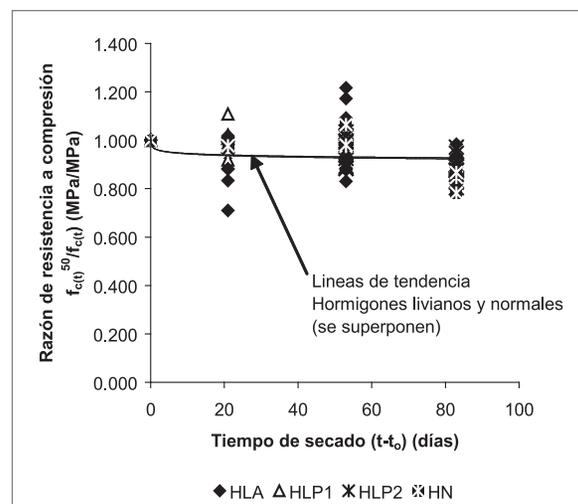


Figura 4. Relación entre el tiempo de secado y la razón de resistencia a compresión $f_{c(t)}^{50}/f_{c(t)}$ de hormigones expuestos a secado

No obstante lo anterior, al observar la Figura 5 se puede notar que al comparar el efecto del secado en la resistencia a compresión de hormigones normales y livianos a 83 días de secado, los hormigones normales sufren un mayor deterioro relativo debido a que sus áridos no aportan con la reserva de agua que si poseen los áridos que son livianos.

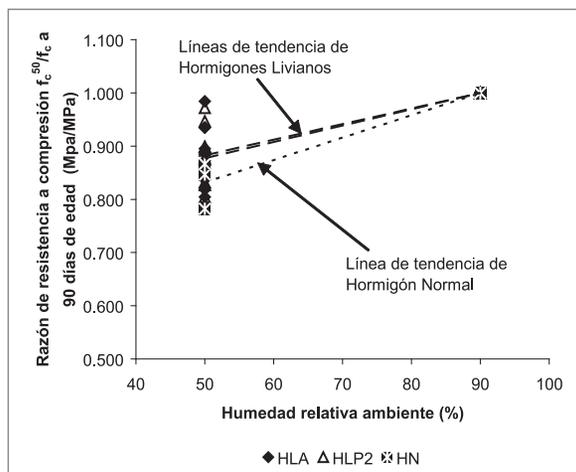


Figura 5. Efecto de la humedad relativa del ambiente en la resistencia cilíndrica a compresión, a 83 días de secado, en hormigones livianos y normales

En definitiva, es posible afirmar que la pérdida de resistencia a compresión del hormigón, producto de la exposición a un ambiente de secado, está controlada por la resistencia y en mayor medida por la proporción en volumen de la fase resistente del hormigón, tal que hormigones con menor cantidad de árido liviano sufren en menor medida los efectos del secado que aquellos que tienen mayor contenido de agua y/o árido liviano, o sea, que son más débiles. Adicionalmente es posible afirmar que bajo una condición de secado permanente, el hormigón sigue perdiendo resistencia a compresión en forma progresiva a medida que aumenta el tiempo de exposición.

A continuación se describen dos ecuaciones que permiten estimar el efecto sobre la resistencia a compresión del hormigón, de la exposición a un ambiente con baja humedad relativa.

La Ecuación 2 muestra la relación que se establece entre la resistencia obtenida en cámara de curado estándar a una determinada edad, la humedad relativa del ambiente de secado, el tiempo de exposición de la probeta a la condición de secado y la resistencia a compresión del hormigón expuesto a dicho ambiente, evaluados a una misma edad.

$$f_{c(t)}^{HR} = (1 - 0.0000325 \cdot (90 - HR) \cdot (t - t_0)) \cdot f_{c(t)} \quad (2)$$

Se ha supuesto una relación lineal entre la reducción de la resistencia a compresión y la humedad relativa del ambiente porque se dispone de resultados sólo a dos humedades relativas diferentes. Esta ecuación alcanza un valor de correlación $R^2 = 0.948$.

Al reemplazar en la ecuación 2 el valor de la resistencia a compresión en condición estándar $f_{c(t)}$, por la ecuación de evolución en el tiempo de la resistencia del hormigón mantenida en condición estándar referida a la resistencia obtenida a 28 días de edad, se tiene la siguiente fórmula general:

$$f_{c(t,t-t_0)}^{HR} = (1 - 0.0000325 \cdot (90 - HR) \cdot (t - t_0)) \cdot \left(\frac{1.08 \cdot t}{1.632 + t} \right) \cdot f_{c(28)} \quad (3)$$

Los parámetros estadísticos de la Ecuación 3 indican un valor de ajuste $R^2 = 0.752$ y un error estándar de la estimación de ± 2.67 MPa (Visauta, 1999). Como se puede notar, al combinar ambas ecuaciones se produce un deterioro en la calidad de la regresión, no obstante, como lo muestra la Figura 6, el ajuste aún es representativo de los resultados obtenidos en laboratorio.

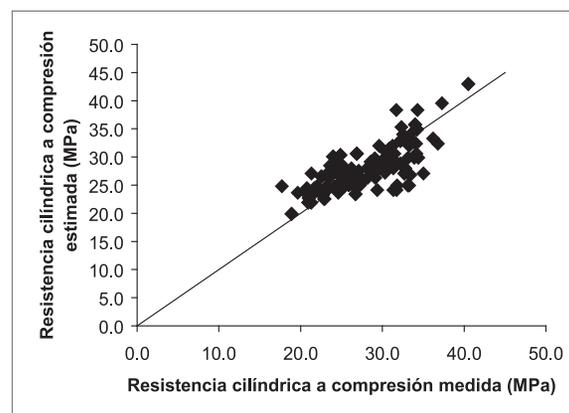


Figura 6. Comparación entre la resistencia a compresión cilíndrica medida y estimada para hormigones livianos y normales expuestos a distintas condiciones de secado

Como se puede ver, el ajuste de la ecuación a los resultados obtenidos en laboratorio es razonablemente bueno. La Ecuación 3 ha sido calibrada con las siguientes condiciones de borde: humedad relativa entre 50 y 90% y $t_0 = 7$ días. La investigación ha supuesto que un tiempo de curado de 7 días representaría una buena condición de curado en terreno.

3.2 Efecto del secado sobre el módulo de elasticidad del hormigón

Tal como se hizo anteriormente, la Figura 7 presenta la relación entre la razón agua-cemento y el cociente entre el módulo de elasticidad obtenido en condición de baja humedad relativa y bajo condición estándar ($E_{c(t)}^{50}/E_{c(t)}$) de hormigones livianos.

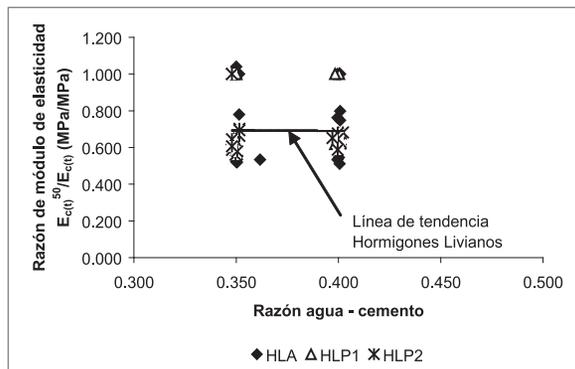


Figura 7. Razón de módulo de elasticidad $E_{c(t)}^{50}/E_{c(t)}$ en función de la razón agua-cemento de hormigones livianos expuestos a secado

La Figura 7 muestra que, ha diferencia de lo que ocurre respecto de la resistencia a compresión, la calidad del mortero no es determinante en la forma en la que el secado afecta la rigidez global del hormigón. Algo similar se puede decir respecto de la influencia del contenido de árido liviano en la mezcla, como lo muestra la Figura 8.

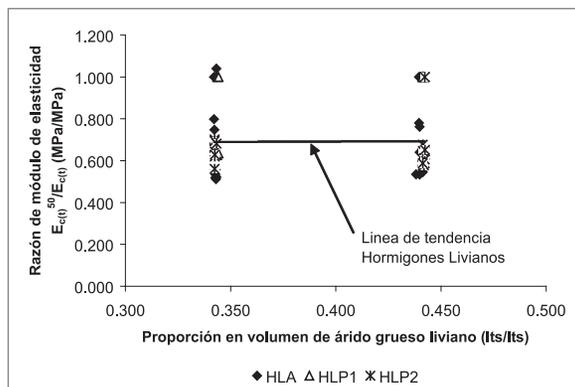


Figura 8. Relación entre la fracción en volumen absoluto de árido grueso liviano y la razón de módulo de elasticidad $E_{c(t)}^{50}/E_{c(t)}$ de hormigones livianos expuestos a secado

La explicación a los fenómenos reportados en las Figuras 7 y 8 radicaría en que, por un lado, el módulo

elástico es una propiedad que depende de la densidad y si se revisan los resultados de pérdida de densidad de los hormigones livianos, en la Tabla 4, se constata que éstas son similares, para una misma razón agua-cemento, no observándose mayor diferencia producto del contenido relativo de árido liviano en la mezcla. Por otra parte, si se analiza la Tabla 2 se puede notar que la diferencia entre las dosis de agua de los morteros o fases resistentes es muy baja (menos de un 1.5%), lo que hace que se comporten de manera similar a los morteros.

Por otra parte, la Figura 9 ilustra la relación entre la calidad del árido liviano y la pérdida de módulo de elasticidad de los hormigones livianos. De acuerdo a dicha figura, a mayor resistencia del árido liviano mayor es la pérdida de módulo de elasticidad por efecto del secado. La explicación a este comportamiento podría encontrarse en las propiedades físicas de los áridos, ya que precisamente aquellos que resultan ser más resistentes, con un parámetro IRA más alto, también poseen un contenido de huecos menor y, por lo tanto, menor capacidad de proveer una reserva de agua para la hidratación de la fase resistente del hormigón durante el secado.

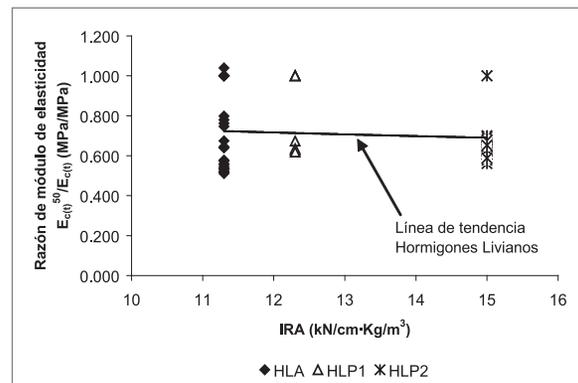


Figura 9. Relación entre la resistencia del árido liviano y la razón de módulo de elasticidad $E_{c(t)}^{50}/E_{c(t)}$ de hormigones livianos sometidos a secado

La Figura 10, por su parte, muestra como se relaciona la resistencia cilíndrica a compresión del hormigón en condición estándar de curado y el cociente del módulo de elasticidad en condición de secado y sometido a un curado húmedo. Esta figura corrobora lo indicado en la Figura 9, en el sentido que a mayor resistencia del hormigón liviano, mayor es el efecto sobre el módulo de elasticidad de la exposición a ambientes con baja humedad relativa.

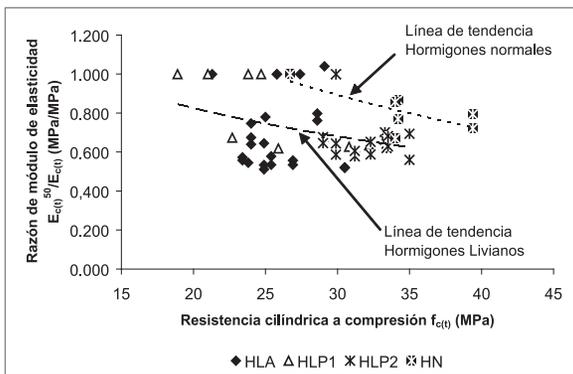


Figura 10. Relación entre la resistencia del hormigón medida en condición estándar y la razón de módulo de elasticidad $E_{c(t)}^{50}/E_{c(t)}$ para hormigones livianos y normales

La Figura 11 muestra la evolución de la razón $E_{c(t)}^{50}/E_{c(t)}$ con el tiempo de exposición del hormigón a la condición de ambiente seco. Se puede notar que la pérdida es brusca hasta los 21 días de exposición (28 días de edad de las probetas), para luego suavizarse, aunque sin estabilizarse, llegando a alcanzar valores promedio cercanos al 60% del módulo que se obtendría en cámara estándar cuando el tiempo de secado alcanza a 83 días. O sea, la pérdida de esta propiedad es significativa.

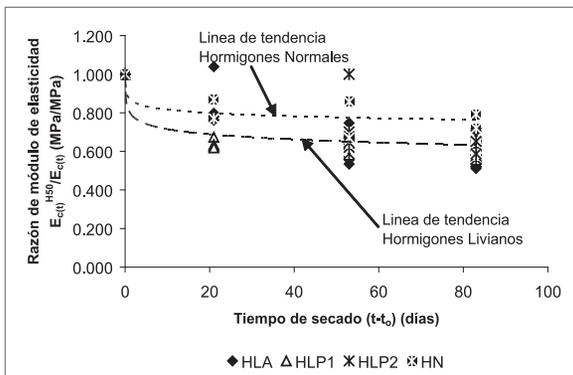


Figura 11. Relación entre el tiempo de secado y razón de módulo de elasticidad $E_{c(t)}^{50}/E_{c(t)}$ de hormigones expuestos a secado

Finalmente, la Figura 12 permite comparar el efecto del secado en el módulo de elasticidad de hormigones livianos y normales, luego de 83 días de secado. Esta figura ratifica lo señalado anteriormente respecto a que a menor resistencia del árido, mayor es la pérdida de módulo de elasticidad por efecto de secado.

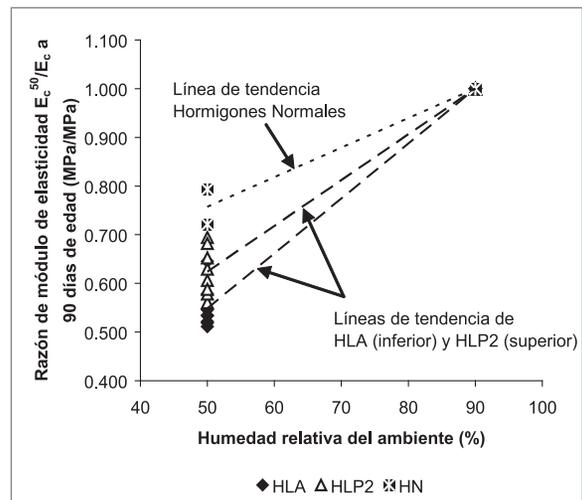


Figura 12. Efecto de la humedad relativa del ambiente en el módulo de elasticidad a 83 días de secado, en hormigones livianos y normales

A continuación, y al igual como se hizo con la resistencia a compresión, se presentan dos ecuaciones que permiten estimar el módulo de elasticidad potencial de un hormigón sometido a un ambiente seco, en función del valor de la propiedad medida en cámara estándar. En este caso, a diferencia de lo que ocurrió respecto de la resistencia a compresión del hormigón, los coeficientes de la ecuación son diferentes para hormigones livianos y de densidad normal.

En primer lugar, la Ecuación 4 permite estimar el módulo de elasticidad del hormigón para una condición de secado dada, en función de la humedad relativa del ambiente, del tiempo de secado y del módulo de elasticidad medido en condición de curado estándar a la edad de interés.

$$E_{c(t)}^{HR} = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{0,0139 \cdot (t - t_0)}{31,955 \cdot (t - t_0)} \right) \cdot (90 - HR) \right) \cdot E_{c(t)} & \text{para } D_c < 2000 \frac{kg}{m^3} \\ \left(1 - \left(\frac{0,0071 \cdot (t - t_0)}{11,849 \cdot (t - t_0)} \right) \cdot (90 - HR) \right) \cdot E_{c(t)} & \text{para } D_c \geq 2000 \frac{kg}{m^3} \end{cases} \quad (4)$$

Al analizar las ecuaciones anteriores, se puede notar que la pérdida de módulo de elasticidad por efecto del secado es menor en hormigones de densidad normal que en menor medida los efectos del secado que los hormigones fabricados con áridos livianos. Este resultado podría deberse a la mayor razón agua-cemento usada en la dosificación de los hormigones normales respecto a la empleada en los hormigones livianos.

Los parámetros estadísticos relevantes de la Ecuación 4 son: $R^2 = 0.971$ y error estándar de la estimación de ± 994 MPa (Visauta, 1999).

La Ecuación 5, por su parte, corresponde a la combinación de la ecuación 4 con la curva de evolución del módulo de elasticidad del hormigón sometido a curado normalizado. Esta última ecuación depende de la densidad y resistencia a compresión del hormigón a la edad de 28 días.

$$E_{c(t,t_0)}^{HR} = 0.043 \cdot D_c^{1.482} \cdot f_{c(28)}^{0.45} \cdot f_{c(28)}^{0.45} \cdot \left(\frac{1.08 \cdot t}{1.632 + t} \right) \cdot \begin{cases} \left(1 - \frac{0.0139 \cdot (t-t_0)}{31.955 \cdot (t-t_0)} \right) \cdot (90 - HR) & \text{si } D_c < 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \left(1 - \frac{0.0071 \cdot (t-t_0)}{11.849 \cdot (t-t_0)} \right) \cdot (90 - HR) & \text{si } D_c \geq 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{cases} \quad (5)$$

Los parámetros estadísticos de la ecuación de evolución en el tiempo indican un valor de ajuste $R^2 = 0.990$ y un error de la estimación de ± 1475 MPa (Tapia, 2004), con lo que la Ecuación 5 logra el siguiente ajuste a los resultados: $R^2 = 0.927$ y un error de ± 1320 MPa, el cual se puede apreciar en la Figura 13.

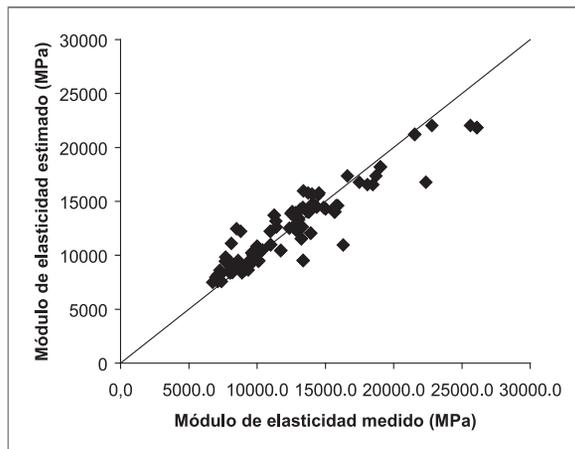


Figura 13. Comparación entre el módulo de elasticidad medido y estimado para hormigones livianos y normales bajo distintas condiciones de secado

Como se puede apreciar de los resultados mostrados en la Figura 13, el ajuste de la ecuación de estimación propuesta a los resultados de laboratorio es bueno.

En definitiva, es posible afirmar que la reducción del módulo de elasticidad de hormigones livianos, producto de la exposición a un ambiente de secado, está condicionada esencialmente por la rigidez del árido que se usa en la mezcla, pero no de su proporción relativa dentro de ésta. También los resultados indican que a

mayor resistencia del árido, menor es el efecto del proceso de secado en la pérdida de módulo de elasticidad del hormigón. Además, se estima que la dosis de agua de los morteros controlaría el efecto del secado sobre el módulo de elasticidad de la fase resistente, pero al ser las dosis de agua muy similares en esta investigación, no permite apreciar la influencia de la calidad del mortero en el deterioro de la rigidez del hormigón. Finalmente es posible afirmar que la magnitud del módulo de elasticidad seguirá disminuyendo a mayor tiempo de secado, pero a una tasa menor que al comienzo del proceso de secado. Es importante notar que de las propiedades estudiadas, el módulo de elasticidad es la que más deterioro sufre por efecto del secado, especialmente en los hormigones livianos.

3.3 Efecto del secado sobre la resistencia a hendidamiento del hormigón

La Figura 14 muestra la relación entre la razón agua-cemento y la razón de la resistencia a hendidamiento medida en condición de secado y en condición saturada, para un mismo tiempo de secado. Esta figura permite notar que los hormigones livianos más secos son más afectados por la pérdida de humedad debido al proceso de secado, lo que se debería a una menor disponibilidad de agua para la hidratación del cemento una vez que el hormigón comienza su proceso de secado.

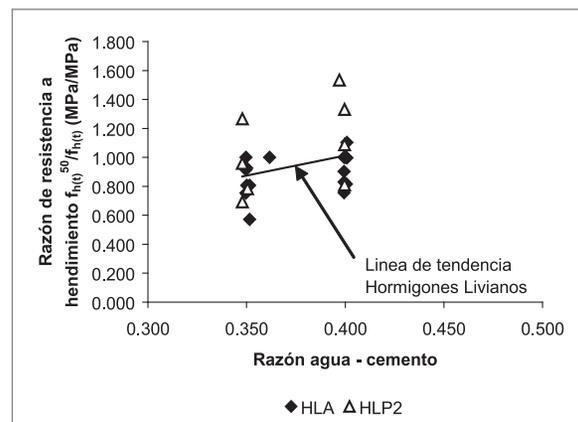


Figura 14. Razón de resistencia a hendidamiento $f_{ht(t)}^{50}/f_{ht(t)}$ en función de la razón agua-cemento de hormigones livianos expuestos a secado

La Figura 15 presenta el efecto del contenido de árido liviano en la mezcla en la pérdida de resistencia a hendidamiento. La figura muestra claramente que a mayor proporción de árido en la mezcla, mayor es la pérdida de resistencia a hendidamiento de los hormigones por efecto

de secado. Esto posiblemente se deba a que el mayor contenido de árido dentro de la mezcla de hormigón interfiere en la integridad de la pasta, facilitando su deterioro por efecto del secado.

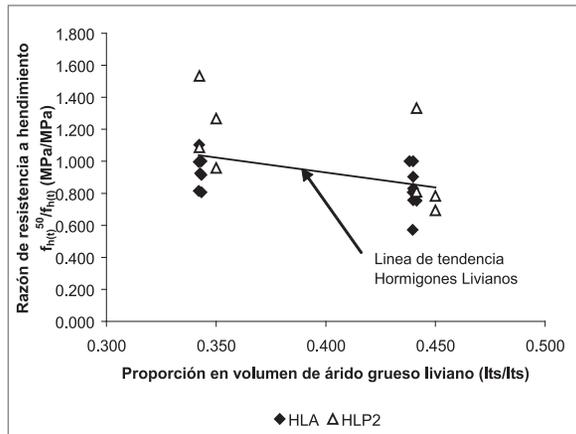


Figura 15. Relación entre la fracción en volumen absoluto de árido grueso liviano y razón de resistencia a hendimiento $f_{h(t)}^{50}/f_{h(t)}$ de hormigones livianos expuestos a secado

Al revisar la influencia de la calidad del árido, como se muestra en la Figura 16, se concluye que a mayor resistencia del árido, menor es la pérdida de resistencia a hendimiento del hormigón. Cabe recordar en este punto que los pellets de ceniza contienen cemento y por lo tanto podrían haber logrado una mejor interfase con la pasta que la piedra pómez.

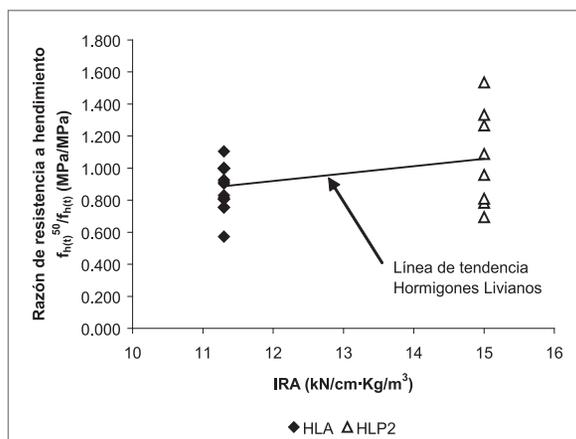


Figura 16. Relación entre la resistencia del árido liviano y la razón de resistencia a hendimiento $f_{h(t)}^{50}/f_{h(t)}$ de hormigones livianos sometidos a secado

Respecto de la evolución de la pérdida de resistencia a hendimiento de los hormigones producto de la exposición al secado, la Figura 17 indica que durante los primeros días de exposición a un ambiente seco, el

hormigón fabricado con árido de densidad normal sufre una pérdida mayor y más rápida de resistencia a hendimiento que los hormigones livianos. Luego, en ambos casos se empieza a estabilizar la pérdida a medida que pasa el tiempo. La mayor pérdida de resistencia a hendimiento en el hormigón normal que en los livianos se debería a que el primero carece de una reserva de agua en los áridos que le permita aliviar el efecto de secado de la pasta de cemento.

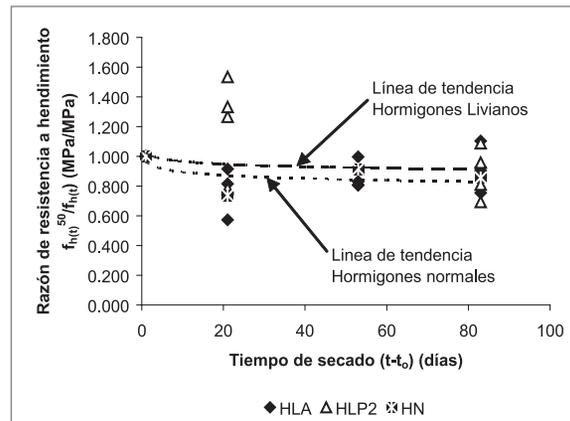


Figura 17. Relación entre el tiempo de secado y razón de resistencia $f_{h(t)}^{50}/f_{h(t)}$ de hormigones livianos y normales expuestos a secado. Se adjuntan las curvas de tendencia para los hormigones livianos y hormigones de densidad normal

Por último, la Figura 18 muestra la forma en la que el efecto de secado se manifiesta en hormigones livianos y de densidad normal, a 83 día de secado, y permite corroborar lo antes mencionado respecto del mayor deterioro en los hormigones normales que en los livianos y dentro de éstos, el mayor daño que sufren aquellos hormigones fabricados con un árido más débil.

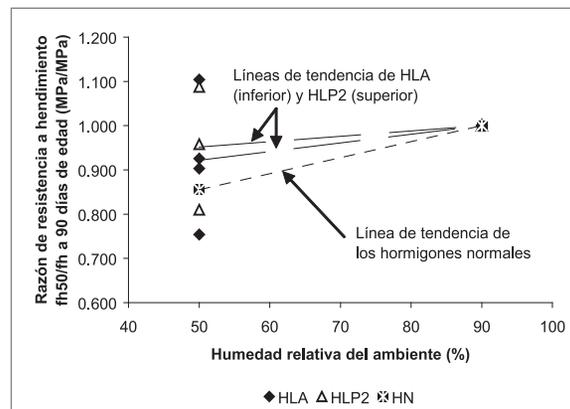


Figura 18. Efecto de la humedad relativa del ambiente en la resistencia a hendimiento a 83 días de secado, en hormigones livianos y normales

En definitiva, respecto de la resistencia a hendidamiento se puede afirmar que la reserva de agua contenida en los áridos livianos es importante para aliviar el efecto de secado. De hecho, se nota que los hormigones que tienen mayor demanda de agua de hidratación por ser más ricos en cemento, al iniciar el secado se deterioran más rápidamente que aquellos con mayor razón W/C.

Otros factores que surgen como relevantes son la calidad o tipo de árido liviano y su proporción en volumen, ya que áridos más resistentes y en menor dosis producen hormigones que se deterioran menos por el secado.

A partir de los resultados medidos se deriva la ecuación 6 que permite estimar la resistencia a hendidamiento de un hormigón bajo una condición de endurecimiento distinta de la estándar a una edad cualquiera, en función de la humedad relativa del ambiente de curado, del tiempo de secado y de la resistencia a hendidamiento del hormigón curado en condición estándar a la misma edad.

$$f_{hd}^{HR} = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{0.0063 \cdot (t - t_o)}{(t - t_o) + 76.771} \right) \cdot (90 - HR) \right) \cdot f_{hd} & \text{para } D_c < 2000 \frac{kg}{m^3} \\ \left(1 - \left(\frac{0.00224 \cdot (t - t_o)}{(t - t_o) - 14.510} \right) \cdot (90 - HR) \right) \cdot f_{hd} & \text{para } D_c \geq 2000 \frac{kg}{m^3} \end{cases} \quad (6)$$

No fue posible determinar una ecuación aceptable que permitiera estimar la resistencia a hendidamiento en función de la resistencia a compresión o de hendidamiento bajo condición estándar a 28 días de edad, ya que los parámetros estadísticos resultaron no significativos. En definitiva, la ecuación 6 es la única estimación posible de la resistencia a hendidamiento y sus parámetros relevantes son: $R^2 = 0.864$ y error estándar de la estimación de ± 0.221 MPa (Visauta, 1999).

El error estándar de la estimación es algo grande debido a la alta variabilidad de los resultados de este ensayo. Aún así, la estimación es razonablemente buena como medida de una tendencia esperable, tal como se puede apreciar en la Figura 19. Lamentablemente el pequeño número de muestras disponibles y la gran variabilidad que éstas presentan hicieron imposible obtener una regresión razonablemente ajustada respecto del valor de resistencia a compresión (y también respecto de la resistencia a tracción por hendidamiento) a 28 días de edad y de su evolución en cámara de curado estándar, tal como se hizo antes respecto de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad.

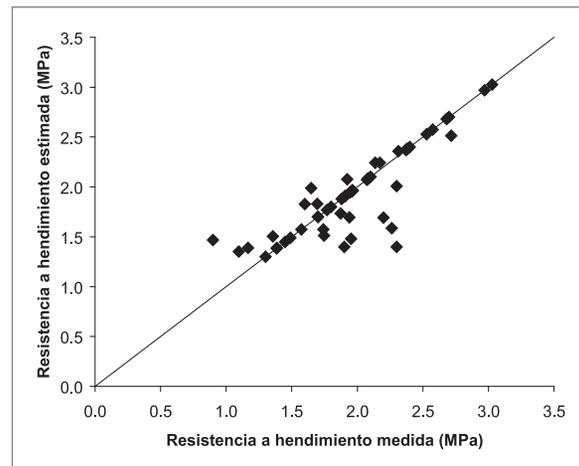


Figura 19. Comparación entre la resistencia a hendidamiento medida y estimada para hormigones livianos y normales bajo distintas condiciones de secado

Es necesario hacer notar que las condiciones de borde de los ensayos realizados corresponden a hormigones que fueron sometidos a un curado estándar durante los 7 primeros días de edad y luego se llevaron a una condición constante de humedad relativa de 50% y $\pm 20^\circ$ de temperatura.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian el importante deterioro que sufren las propiedades resistentes y elásticas del hormigón liviano por efecto de someterlo a un ambiente con baja humedad relativa, menor a la de saturación. Por lo tanto, al momento de proyectar o construir una obra con hormigón liviano se debiera considerar la magnitud de la reducción de estas propiedades. Si bien el estudio realizado se ha centrado en el efecto que el secado tiene sobre hormigones livianos estructurales, sus resultados y conclusiones pueden hacerse extensivos, con limitaciones, a hormigones de densidad normal.

Al momento de revisar o intentar extrapolar los resultados de esta investigación, es necesario recordar que el procedimiento de secado al que fueron expuestas las probetas cumplió dos condiciones que son relevantes. La primera de ellas es que el secado fue brusco, pasando de la saturación directamente a una cámara de secado. La segunda, es que el proceso de secado se realizó a una humedad constante hasta la fecha de ensayo.

Respecto del fenómeno de secado propiamente tal, la literatura especializada indica que éste causaría tensiones dentro de la matriz de hormigón. Asimismo es relevante destacar que el efecto de curado interno debido al agua de absorción almacenada en los áridos livianos ha sido menor en esta investigación que el reportado por la literatura (Holms y Bremner, 2000), porque la matriz de mortero fabricada no ha sido tan impermeable como en el caso de hormigones livianos de alto desempeño ya que no se han usado ni aditivos ni adiciones y sólo se presenta significativo respecto de la resistencia a tracción.

La influencia del secado sobre las propiedades resistentes y elásticas de hormigones livianos aparece regulada por las siguientes variables:

- Razón agua-cemento. En general a mayor razón agua-cemento, más débil y permeable es la fase resistente del hormigón liviano. A mayor permeabilidad de esta fase, mayor es el efecto del secamiento sobre las propiedades mecánicas en compresión (en especial la resistencia), porque el fenómeno de curado interno no tendría tiempo de suplir la pérdida de agua para hidratación del cemento por rápida evaporación. En el caso de la resistencia tracción sucede lo contrario, comportamiento que podría deberse a una reducción de las tensiones internas del hormigón producto del secado, por la menor demanda de agua de la fase resistente débil, atenuando el efecto de secado para esta sollicitación.
- Proporción de árido liviano. En general a mayor cantidad de árido liviano en el hormigón, mayor es el efecto del secado sobre las propiedades del hormigón liviano. Este comportamiento se debería a que la dosis de fase resistente presente en el hormigón es dominante en la respuesta mecánica del material.
- Resistencia del árido liviano. En general áridos más resistentes dan como resultado hormigones que son menos afectados por la disminución brusca y permanente de la humedad relativa del ambiente.
- Tiempo de secado. En general a mayor tiempo de exposición a un ambiente de baja humedad relativa, mayor es la pérdida de propiedades que sufre el hormigón. La reducción de las propiedades aparenta estabilizarse para períodos superiores a 83 días de secado.

El secado produce fisuración interna de la matriz de cemento, la cual no resulta muy gravitante respecto de la resistencia a compresión, donde la pérdida promedio es de sólo un 15%. Respecto del módulo de elasticidad,

esta fisuración produciría mayor deformabilidad del material, es decir menor rigidez, llegándose a pérdidas promedio de hasta un 40% a los 90 días de edad. Finalmente, en el caso de hendidamiento la fisuración interna facilita la rotura del hormigón, llegándose a pérdidas promedio de un 20% a los 83 días de secado de las probetas.

Para futuros desarrollos queda pendiente un estudio más extensivo sobre el proceso de secado en hormigones de densidad normal, que abarque distintas dosificaciones. Otros aspectos que restan por analizar son el efecto del tiempo de curado húmedo y de las condiciones de secado. En la investigación se aplicó un proceso de secado y consideró un tiempo de curado húmedo de 7 días que no necesariamente representa las condiciones más reales en la práctica. Es necesario también evaluar si un secado gradual o variaciones de la humedad relativa del ambiente atenuarían o no el efecto final de secado en las propiedades del hormigón. Esta investigación permitirán predecir más acertadamente el comportamiento de una obra de hormigón liviano expuesta a condiciones de servicio.

5. Referencias

- ACI-Committee-213 (1999), Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. Committee 213. Farmington Hills, MI.
- ASTM C143 (1990), American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Slump of Portland Cement Concrete. Vol 04.02: Concrete and aggregates.
- ASTM C567 (1999), American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Unit Weight of Structural Lightweight Concrete. Vol 04.02: Concrete and aggregates.
- ASTM C173 (1994), American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method. Vol 04.02: Concrete and aggregates.
- ASTM C39 (1986), American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Specimens. Vol 04.02: Concrete and aggregates.
- ASTM C469 (1994), American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. Vol 04.02: Concrete and aggregates.
- ASTM C496 (1996), American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of

- Cylindrical Concrete Specimens. Vol 04.02: Concrete and aggregates.
- British Standards Institute (1975), Methods for sampling and testing of mineral aggregates, sand and fillers – Mechanical Properties. BS 812: Part 3. London.
- Clarke John L. (1993), Structural Lightweight Aggregate Concrete. Blackie Academic and Profesional, London.
- Holm T. y Bremner T. (2000), State of the Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, Engineer Research and Development Center, US Army Corps of Engineers, pp. 116.
- López M. (1999), Proposición de una Metodología de Dosificación de Hormigones Estructurales con Aridos Livianos. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Martínez P. (2003), Desarrollo de Áridos Livianos de Cenizas Volantes para Hormigones Estructurales, Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Tapia P. (2004), Caracterización de Propiedades de Diseño de Hormigones Livianos Estructurales. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Videla C. y López M. (2000), Mixture Proportioning Methodology for Structural Sand Lightweight Concrete. ACI Materials Journal, Vol. 97, N°3, pp. 281-289.
- Videla C. y Martínez P. (2002), Physical, Mechanical and Microscopic Characterization of Cold Bonded Fly Ash Lightweight Aggregates. Revista Materiales de Construcción, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Vol. 52, N° 268, Octubre - Diciembre 2002, pp. 5-18.
- Visauta B. (1999), Análisis estadístico con SPSS para Windows. Mc Graw – Hill, Madrid.