

INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA INTRINSECA DEL ARIDO LIVIANO EN LA RESISTENCIA A COMPRESION Y RIGIDEZ DEL HORMIGON LIVIANO

INFLUENCE OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE INTRINSIC STRENGTH ON COMPRESSIVE STRENGTH AND MODULUS OF ELASTICITY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE

Por / By Carlos Videla C., Mauricio López C.

Resumen

El hormigón liviano ha sido utilizado en muchas obras desde la segunda mitad del Siglo XX, debido a que en ciertas aplicaciones son una alternativa conveniente respecto al hormigón convencional. Sin embargo el desarrollo de su tecnología ha sido limitado, porque su estudio ha estado enfocado principalmente a resolver casos particulares. Este trabajo pretende, por lo tanto, ser un aporte a la generalización del conocimiento sobre este material. El objetivo de la investigación fue estudiar el efecto que tiene el reemplazo de árido grueso convencional por un árido liviano, en las propiedades mecánicas del hormigón. El modelo aplicado conceptualiza al hormigón con áridos livianos como un material de dos fases, una denominada "soportante", constituida por mortero normal (pasta de cemento y arena normal) y otra "liviana", formada por árido grueso liviano. La primera aporta la resistencia estructural y la segunda disminuye la densidad del hormigón. De esta forma sería posible describir el comportamiento mecánico del hormigón en función de parámetros del árido liviano y de la pasta de cemento.

El diseño de la fase experimental consideró la fabricación y ensayo de un gran número de mezclas de prueba, en las que se varió el tipo y proporción de cada fase, para analizar su efecto sobre las propiedades mecánicas del hormigón liviano.

A partir de los resultados se proponen relaciones entre la resistencia a compresión y rigidez del hormigón liviano y sus variables de dosificación (diseño de mezcla). Asimismo, se propone un índice para caracterizar la capacidad estructural del árido liviano, que es de fácil medición y que permite estimar las propiedades mecánicas potenciales del hormigón que se podrían obtener con el uso de un árido determinado

Palabras Clave: *áridos livianos, resistencia a compresión, modulo de elasticidad, resistencia áridos, expresiones propiedades mecánicas*

Abstract

Lightweight concrete has been used in many applications since the second half of the XX century and has become a very good alternative compared with conventional concrete. However the development of its technology has not been enough because the related studies have been focused mainly to resolve particular cases. This research seeks to generalise the knowledge about this type of material. The main objective of this project is to study the effects in mechanical properties, of the replacement of the conventional coarse aggregate with a lightweight one. Lightweight aggregate concrete may be conceived as a two – phase material: a “resistant phase” constituted by normal mortar (cement paste and natural sand) and a “lightweight phase” formed by the lightweight coarse aggregate. The resistant phase gives the structural strength and the lightweight phase reduces the concrete’s density. In this way it would be possible to describe the mechanical behaviour of concrete in relation to parameters of lightweight aggregate and the cement paste.

An extensive experimental programme was carried out, including 47 trial mixes, in which the type and proportion of each one of the phases were varied to analyse the principal factors directly affecting the lightweight concrete mechanical properties.

The obtained results allow for the proportion of relationship between the compressive strength and modulus of elasticity of lightweight concrete and its proportioning variables (mix design). At the same time, an easy measured index is proposed to characterise the structural capacity of lightweight aggregate, this index allow estimating the potential mechanical properties of concrete which can be obtained using a determined aggregate.

Keywords: *lightweight aggregates, compressive strength, modulus of elasticity, aggregates' strength, mechanical properties expressions*

1. INTRODUCCION

El hormigón liviano se define en ACI 213R (1987) como aquel que posee una densidad en estado seco al aire menor a 1.850 kg/m^3 , y pueden dividirse en tres tipos: hormigón aireado, que se fabrica con aditivos espumantes, hormigón sin finos y hormigón con áridos livianos. Con el uso de áridos livianos se ha logrado obtener resistencias mecánicas importantes; de esta manera surge el concepto de hormigón liviano estructural, el cual se describe en ACI 213R (1987), como aquel hormigón liviano con una resistencia a compresión cilíndrica superior a $17,2 \text{ MPa}$ (resistencia a compresión cúbica superior a $19,0 \text{ MPa}$ - López, 1999). El hormigón con áridos livianos considera el reemplazo parcial (fracción gruesa) o total del árido normal por otro de menor densidad. Así surgen los nombres de "Sand Lightweight Concrete" y "Lightweight Aggregate Concrete", respectivamente.

El uso de hormigón liviano estructural presenta, entre otras ventajas, estructuras de menor peso propio las que requieren de fundaciones de menor tamaño, permiten edificaciones de mayor altura y el desarrollo de tecnologías de prefabricación, disminuyen las fuerzas sísmicas y presentan un mejor comportamiento térmico.

Se debe mencionar que las propiedades del hormigón con áridos livianos dependen en gran medida de la cantidad y propiedades del árido particular que se esté utilizando. Gran parte del desarrollo de éstos se ha concentrado en la Arcilla y Pizarra expandidas, áridos con los que se han logrado las mejores propiedades mecánicas. Sin embargo, al aplicar dichas dosificaciones a otros tipos de áridos se observan grandes diferencias. Además, al variar otros componentes del hormigón (dosis de cemento, agua, granulometría), sus propiedades también se ven afectadas, de lo que es posible inferir que el uso de un determinado árido liviano no define totalmente las propiedades del hormigón.

Como consecuencia de la gran variedad de áridos livianos que es posible utilizar y la influencia de los otros componentes, la tecnología del hormigón liviano no ha llegado a los mismos niveles de conocimiento, desarrollo y aplicación que la tecnología del hormigón tradicional. Se hace importante contar con una tecnología adecuada para el diseño y fabricación de hormigón liviano. Para tal efecto es de gran importancia estudiar y cuantificar, entre otras cosas, el efecto en la resistencia y rigidez del hormigón del uso de áridos livianos con una menor resistencia intrínseca que áridos de densidad normal de origen silicio y calcáreo. Esto posibilitaría la dosificación del hormigón en base a áridos livianos disponibles en cada país y la predicción de sus propiedades mediante procedimientos o métodos teórico - empíricos.

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar expresiones que permitan describir el efecto que tiene en las propiedades mecánicas del hormigón, el tipo y cantidad de cada fase componente.

2. TECNOLOGIA DEL HORMIGON LIVIANO

La resistencia a compresión en un hormigón convencional depende fundamentalmente de la resistencia de la pasta de cemento y de la interfase pasta - árido. Estas resistencias, para hormigón de baja a media resistencia, están determinadas por su porosidad, la que depende principalmente de la razón agua/cemento (W/C) y del tipo de cemento utilizado. En este tipo de hormigón las propiedades del árido no son significativas desde el punto de vista mecánico, ya que por lo general su resistencia y rigidez son superiores a los de la pasta y de la interfase.

Al fabricar un hormigón con áridos livianos se está agregando un componente nuevo que tiene un peso específico, resistencia intrínseca y rigidez menor que los áridos normales. Esta diferencia, sin lugar a dudas, tenderá a disminuir la magnitud de la resistencia y rigidez del hormigón.

De esta manera Holm (1995), plantea la existencia de una resistencia límite ("ceiling strength"), la que define como aquella resistencia desde la cual un aumento en la cantidad de cemento no trae consigo un aumento significativo de resistencia. Esta resistencia límite es diferente para cada árido liviano y depende tanto del tamaño y distribución de su porosidad, como también de las características resistentes del material que envuelve los poros.

El hormigón con árido grueso liviano y arena de densidad normal puede ser conceptualizado como un material de dos fases, una soportante constituida por mortero de peso normal (cemento, agua y arena normal) y otra fase liviana formada por el árido de baja densidad. La resistencia mecánica y rigidez del hormigón dependerán entonces de la resistencia, rigidez y proporción de cada una de las fases constituyentes. El concepto de las dos fases puede ser aplicado porque la interfase o zona de transición no sería un factor limitante de las propiedades en este tipo de hormigón. Además, como el módulo de elasticidad real de los áridos livianos es por lo general menor que el módulo de la fase soportante, las partículas del árido liviano actuarán como puntos débiles, aún teniendo una elevada resistencia propia.

Como consecuencia de lo expuesto, las relaciones tradicionales entre la resistencia del hormigón y su razón agua/cemento (W/C) pierden validez para el hormigón liviano, ya que no consideran las particularidades del árido utilizado.

Para caracterizar la resistencia intrínseca del árido se cuenta con diversas alternativas. Existen metodologías directas, como ensayo a compresión o hendidamiento en una probeta del material; para ello se requieren probetas de ciertas dimensiones mínimas, las que no siempre son posibles de obtener (Weigler, 1974). Métodos indirectos de medir dicha resistencia se proponen en la norma británica BS 812: Part 3: 1975, donde es posible encontrar 5 diferentes ensayos que entregan como resultado un índice que representa la resistencia del árido.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Con el fin de determinar la influencia de las variables de dosificación (dosis de cemento, agua, árido liviano grueso y fino de densidad normal) en la resistencia a compresión y rigidez del hormigón liviano, se propuso un programa experimental basado en el concepto de las dos fases. Para ello se consideró seis tipos de fase soportante en las que se varió su razón W/C y así su resistencia a compresión y rigidez. Además se utilizó tres tipos de fase liviana, dos de origen natural constituidas por piedra pómez de diferentes características, denominadas como Pómez 1 y Pómez 2, y un tercer tipo de fase liviana artificial, conocida como arcilla expandida (Leca). La Figura 1 presenta el diseño experimental del estudio, donde es posible distinguir tres ramas principales con cada tipo de árido liviano utilizado. Dentro de cada tipo de fase liviana es posible apreciar

hormigones con diferente fase soportante y proporcionamiento.

3.1. Materiales y Fabricación

En la elaboración de las amasadas de prueba se utilizó una mezcla en iguales proporciones de dos marcas de cemento Portland Puzolánico, la Tabla 1 muestra las propiedades del cemento obtenido.

Las propiedades de los áridos considerados se presentan en la Tabla 2. Para caracterizar los áridos se consideró la realización de los ensayos rutinarios que incluyen densidad real y aparente, absorción y granulometría (representada por el módulo de finura) y dos ensayos especiales de resistencia intrínseca propuestos por la norma inglesa BS 812: Parte 3, 1975 denominados valor del 10% de finos (TPFV) y valor de trituración del árido (ACV).

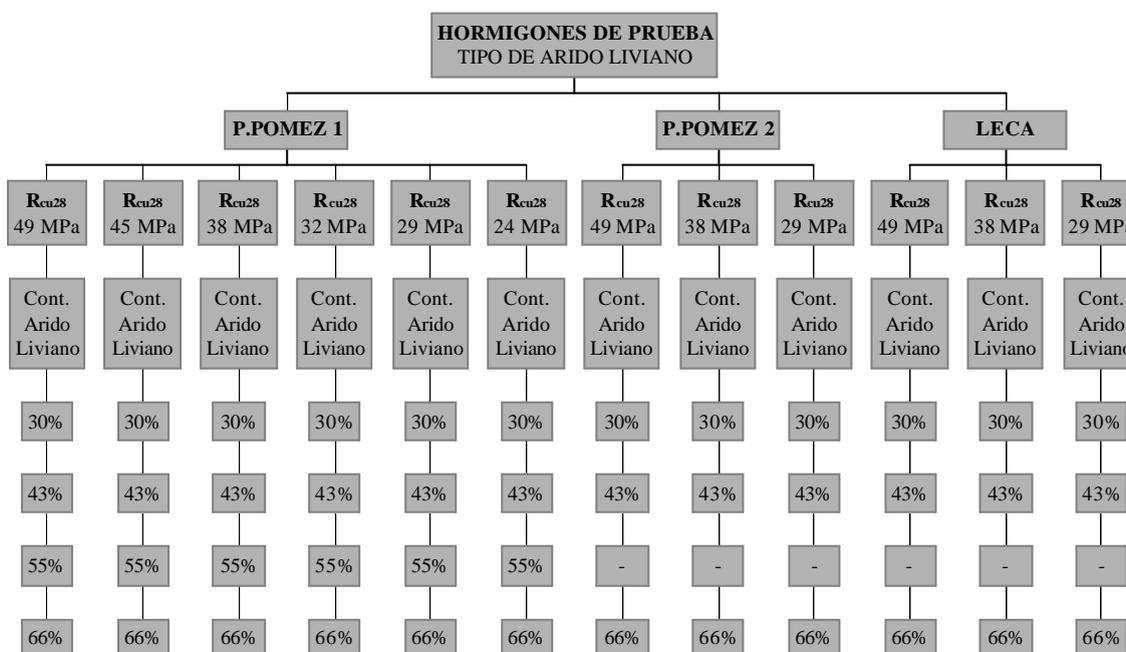


Figura 1. Diseño Experimental.

Tabla 1. Propiedades del cemento utilizado en las mezclas de prueba.

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Densidad Real (kg/m ³)	2.922	Agua de Consistencia Normal (cm ³)	32,0
Finura Blaine (cm ² /g)	4.365	Tiempo Fraguado inicial	4:00
Resist. flexo 7 días (MPa)	4,5	Vicat (h) final	6:00
Resist. flexo 28 días (MPa)	6,3	Contenido Puzolana (%)	28,9
R _{Rilem7} (MPa)	23,9	Contenido Yeso (%)	5,3
R _{Rilem28} (MPa)	33,2		

3.2. Dosificaciones, Ensayos y Presentación de

Resultados

Las dosificaciones de las mezclas fueron efectuadas a partir del reemplazo de la fase soportante por la liviana, de manera de analizar su efecto en las propiedades del hormigón. La nomenclatura consiste en una letra "M" de mortero y en caso de ser hormigón un signo "P1", "P2" o "L", que corresponde a la identificación del árido liviano, piedra pómez 1, piedra pómez 2 y Leca, respectivamente. A continuación un número que corresponde a la resistencia a compresión cúbica de la fase soportante en MPa (49, 45, 38, 32, 29, 24) y finalmente un número que representa el contenido porcentual en volumen de árido liviano. El proporcionamiento de cada mezcla de prueba y sus principales resultados se presenta en la Tabla 3.

A cada mezcla se le realizó diferentes ensayos en estado fresco, entre los que destacan medición del asentamiento del cono de Abrams (ASTM C143, 1990), medición de la densidad en estado fresco (ASTM C138, 1981), medición del contenido de aire con el método volumétrico (ASTM C173, 1978). En estado endurecido se realizó el ensayo de resistencia a compresión a probetas cilíndricas a 7 y 28 días de edad (ASTM C39, 1986) y a probetas cúbicas a 3, 7 y 28 días (NCh 1037, 1977), módulo de elasticidad a 7 y 28 días (ASTM C469, 1987); todas las probetas conservadas en curado normalizado (20 ± 3 °C y HR > 90%). Finalmente, a probetas en estado seco al aire se les realizó la medición de la densidad (ASTM C567, 1991), resistencia a compresión y módulo de elasticidad.

Tabla 2. Propiedades de los áridos utilizados en las mezclas de prueba.

	P. Pómez 1	P. Pómez 2	Leca	Arena Normal
D_{RSS} (kg/m ³)	1.245	1.228	1.120	2.556
D_{Rseca} (kg/m ³)	887	573	982	2.483
D_{acs} (kg/m ³)	564	314	640	1.549
Absorción (%)	40,0	85,0	17,0	2,9
Módulo de Finura M_f	5,96	5,42	5,96	1,74
TPFV(kN)	35	24	69	-
ACV (%)	79	97	52	-

Tabla 3: Proporcionamiento de las mezclas de prueba (kg/m³)

Tipo	C	W	Al	An	Tipo	C	W	Al	An	Tipo	C	W	Al	An
M49	853	299	0	952	M38	696	313	0	1.085	M29	705	388	0	980
P1//49/30	538	188	463	600	P1//38/30	455	205	431	709	P1/29/30	509	280	342	707
P1//49/43	460	163	613	513	P1//38/43	380	171	570	591	P1/29/43	416	228	490	577
P1//49/55	351	123	721	393	P1//38/55	295	132	695	459	P1/29/55	328	181	643	456
P1//49/66	261	91	856	291	P1//38/66	217	98	828	337	P1/29/66	260	140	786	384
P2//49/30	555	194	459	620	P2//38/30	467	210	425	728	P2/29/30	516	283	332	717
P2//49/43	455	159	577	509	P2//38/43	388	174	556	604	P2/29/43	424	233	475	588
P2//49/66	256	90	784	287	P2//38/66	231	104	824	361	P2/29/66	255	139	780	353
L/49/30	580	203	371	648	L/38/30	480	216	337	748	L/29/30	536	295	267	743
L/49/43	494	173	471	552						L/29/43	467	257	395	648
L/49/66	342	120	702	382	L/38/66	283	127	675	440	L/29/66	301	166	621	419
M45	702	281	0	1.147	M32	704	352	0	1.040	M24	701	420	0	907
P1/45/30	431	172	464	703	P1/32/30	504	248	329	744	P1/24/30	549	329	287	709
P1/45/43	366	147	608	598	P1/32/43	427	214	483	630	P1/24/43	454	272	457	588
P1/45/55	286	115	727	467	P1/32/55	340	170	628	503	P1/24/55	335	201	585	433
P1/45/66	212	85	863	347	P1/32/66	260	140	786	384	P1/24/66	264	159	794	342

Tabla 4: Resultados ensayos en mezclas de prueba

Tipo	D	R _{cu3}	R _{cu7}	R _{cu28}	E ₇	E _h	Tipo	D	R _{cu3}	R _{cu7}	R _{cu28}	E ₇	E _h	Tipo	D	R _{cu3}	R _{cu7}	R _{cu28}	E ₇	E _h
	kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
M49	2.110	30,4	36,7	49,1	14.000	17.675	M38	2.093	19,1	27,3	38,2	12.950	16.975	M29	2.063	13,7	19,9	28,7	11.200	14.700
P1/49/30	1.810	13,3	19,1	25,6	5.600	11.375	P1//38/30	1.767	10,8	15,1	20,1	8.400	10.325	P1/29/30	1.803	9,7	13,6	18,2	8.400	10.500
P1/49/43	1.693	5,9	10,3	15,5	6.650	9.975	P1/38/43	1.697	9,2	13,1	16,8	6.300	8.575	P1/29/43	1.693	7,4	10,8	15,5	7.350	8.925
P1/49/55	1.573	7,9	10,6	14,7	3.150	8.750	P1/38/55	1.543	4,8	7,2	11,7	4.900	6.825	P1/29/55	1.537	6,5	9,2	13,6	6.300	7.525
P1/49/66	1.533	3,1	6,1	10,2	4.200	6.300	P1/38/66	1.550	4,1	6,8	10,6	4.550	5.950	P1/29/66	1.533	4,7	6,5	10,5	5.250	7.000
P2/49/30	1.797	16,1	17,8	25,8	10.500	12.600	P2/38/30	1.770	8,6	12,5	17,2	4.550	9.800	P2/29/30	1.817	9,0	14,1	19,5	8.050	11.375
P2/49/43	1.673	12,2	13,8	18,6	5.950	10.675	P2/38/43	1.683	6,5	9,4	14,1	5.250	7.525	P2/29/43	1.707	7,6	10,4	15,2	6.300	8.575
P2/49/66	1.360	4,1	4,6	6,1	4.200	4.550	P2/38/66	1.487	1,8	3,2	5,5	2.450	3.675	P2/29/66	1.513	3,4	5,8	8,3	3.850	4.900
L/49/30	1.777	27,3	34,1	39,1	12.600	14.525	L/38/30	1.727	17,7	23,7	30,9	10.500	12.250	L/29/30	1.837	11,6	16,6	24,2	5.950	11.200
L/49/43	1.687	26,0	30,9	34,9	11.900	12.950							L/29/43	1.720	13,3	14,3	20,6	8.050	9.800	
L/49/66	1.510	21,2	25,6	28,8	9.450	11.025	L/38/66	1.463	10,5	15,2	22,1	7.700	9.275	L/29/66	1.500	5,1	9,0	14,4	6.300	7.525
M45	2.127	22,0	32,6	45,2	13.300	16.275	M32	2.077	15,8	23,3	32,5	11.900	16.100	M24	1.980	10,2	15,7	24,4	9.100	13.475
P1/45/30	1.770	11,7	15,1	20,2	8.050	9.975	P1/32/30	1.803	12,8	17,4	23,9	8.750	11.200	P1/24/30	1.843	8,2	11,3	16,7	7.350	10.675
P1/45/43	1.653	7,2	9,2	13,7	6.300	8.400	P1/32/43	1.707	10,2	13,6	17,8	7.350	8.750	P1/24/43	1.680	5,1	8,4	13,4	7.700	8.925
P1/45/55	1.557	5,6	8,7	12,9	5.600	7.525	P1/32/55	1.620	7,1	10,9	14,6	5.950	7.700	P1/24/55	1.453	3,3	5,3	9,2	3.500	5.775
P1/45/66	1.457	2,1	4,1	7,1	3.500	4.900	P1/32/66	1.513	3,5	5,8	9,5	4.200	5.950	P1/24/66	1.477	2,5	4,2	7,7	3.850	5.075

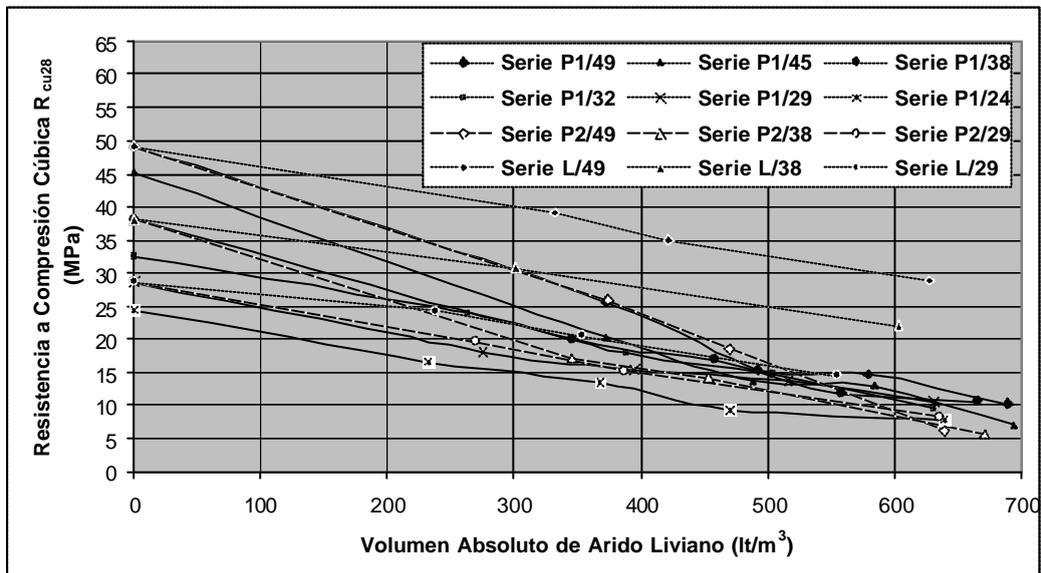


Figura 2. Resistencia a compresión del hormigón en función del tipo y volumen absoluto de árido liviano.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados de los ensayos de densidad, resistencia a la compresión cúbica y módulo de elasticidad realizados a cada mezcla de prueba se presentan en la Tabla 4.

En la tabla presentada se han agrupado las mezclas de prueba por tipo de fase soportante. Así, el hormigón que inicia cada serie representa un mortero normal con un 100% de fase soportante y 0% de fase liviana; las siguientes mezclas muestran paulatinamente un aumento de la fase liviana con relación a la soportante.

Como era de esperar, los resultados indican que la resistencia a compresión cúbica del hormigón y su módulo

de elasticidad disminuyen al aumentar la proporción de la fase liviana y disminuir su resistencia intrínseca. El árido liviano tiene una resistencia propia y rigidez menor que la fase soportante, por lo que al aumentar la dosis del primero, el hormigón, que combina el comportamiento de ambas fases, se ve afectado.

4.1. Resistencia a Compresión del Hormigón

La Figura 2 muestra la relación entre la resistencia a compresión del hormigón y el contenido de árido liviano. Se han diferenciado los hormigones por tipo de árido liviano utilizado en su fabricación, de manera de apreciar el efecto de la resistencia de la fase liviana en la resistencia a compresión del hormigón.

Como se puede apreciar, existe una disminución en la resistencia a compresión al aumentar el contenido de fase liviana en el hormigón. Dicha disminución no es constante y depende principalmente de la resistencia de cada fase.

Si se hace una distinción entre tipo de fase liviana utilizada, se puede comprobar que las mezclas con arcilla expandida experimentan una menor caída en la resistencia que el resto. Ahora, si se considera la resistencia de la fase soportante, se aprecia que el grado de disminución en la resistencia es más pronunciado en hormigones con fase soportante de mayor capacidad. Esto se debería a que existe una mayor diferencia entre las resistencias propias de cada

fase, por lo que es más notorio en la resistencia del hormigón el reemplazo entre fases.

Además es posible apreciar en la Figura 2 la aparición de la resistencia límite ("Ceiling Strength"), enunciada por Holm (1995). Para contenidos de Piedra Pómez 1 y Piedra Pómez 2 por sobre los 500 lt/m^3 de hormigón, la resistencia varía muy poco. Esto se debería a que la resistencia del hormigón, con esas proporciones de árido liviano, está gobernada en mayor medida por las propiedades de dicho árido.

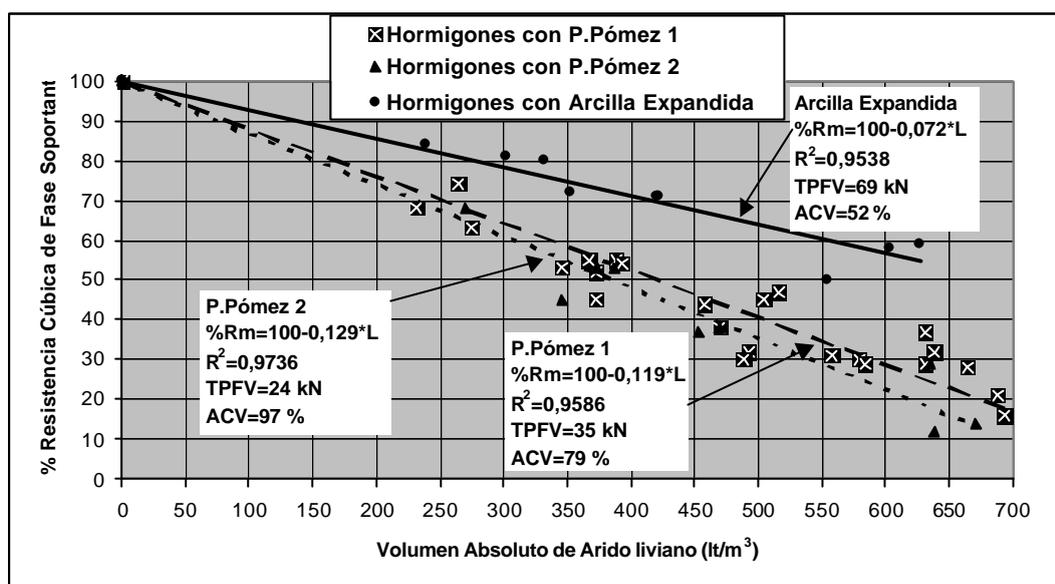


Figura 3. Regresión entre la resistencia a compresión expresada como % de la resistencia de la fase soportante, y volumen absoluto de árido liviano en función de sus características resistentes.

La Figura 3 muestra la relación entre la resistencia a compresión del hormigón, expresada como porcentaje de la resistencia de la fase soportante, y el contenido de árido liviano. Se han diferenciado los hormigones por tipo de árido liviano utilizado y se han efectuado regresiones para cada uno.

La figura muestra claramente una caída en la resistencia a compresión a medida que aumenta el volumen absoluto de árido liviano. Se debe destacar que las tres regresiones propuestas explican más de un 95% de la variabilidad en la resistencia del hormigón. Así, para una dosis absoluta de árido liviano de aproximadamente 500 lt/m^3 , se tienen resistencias en el hormigón de un 64,0, 40,5 y 35,5% de la resistencia de la fase soportante, para los hormigones con arcilla expandida, piedra pómez 1 y piedra pómez 2, respectivamente.

Por otra parte, a medida que la resistencia intrínseca del árido disminuye (representada por el valor del 10% de finos, TPFV), menor es la resistencia del hormigón a igual

contenido de árido liviano. La piedra pómez 2, que tiene un TPFV de 24 kN, coincide con la recta de regresión más inclinada.

A partir de los análisis efectuados se dedujo la Fórmula 1, expresión que permite estimar la resistencia a compresión cúbica del hormigón, a la edad de 28 días y en condición húmeda, en función de la cantidad y características resistentes de la fase soportante y liviana. El análisis estadístico indicó que las variables relevantes en la magnitud de la resistencia a compresión cúbica del hormigón (R_{cu28}), son las siguientes: resistencia de la fase soportante (R_m), volumen absoluto de árido liviano (L) y valor del 10% de finos (TPFV) como índice resistente del árido liviano; este último representa la magnitud de la carga necesaria para producir en una muestra de árido liviano una trituration equivalente al 10% de su peso. Los parámetros estadísticos relevantes se presentan en la Tabla 5.

$$R_{cu28} = c_0 + c_1 * e^{c_2 * L} + c_3 * R_m + c_4 * TPFV + c_5 * e^{c_2 * L} * R_m + c_6 * e^{c_2 * L} * TPFV + c_7 * R_m * TPFV + c_8 * e^{c_2 * L} * R_m * TPFV \quad (1)$$

donde:

R_{cu28} : Resistencia a compresión cúbica del hormigón a la edad de 28 días y con curado húmedo (MPa)

R_m : Resistencia a compresión cúbica de la fase soportante, a la edad de 28 días y con curado húmedo (MPa)

L : Volumen absoluto árido liviano (lt/m^3)

TPFV : Valor del 10% de finos (kN)

Tabla 5. Parámetros estadísticos de Fórmula 1.

Parámetro	Estimación	T - estadístico	Valor - P
C_0	25,881	4,1096	0,0002
C_1	-37,442	-3,2246	0,0026
C_2	-0,0021	2,7059	0,0100
C_3	-1,1354	-6,9938	0,0000
c_4	-0,40388	-3,1423	0,0032
c_5	2,7472	8,5846	0,0000
c_6	0,43071	3,3292	0,0019
c_7	0,0214	6,7068	0,0000
c_8	-0,0228	-7,0786	0,0000
Análisis de Varianza			
Fuente (Grado Libertad)	Varianza	Cuociente F	Valor P
Modelo (9)	22.400	916,68	0,0000
Residual (38)	103,17		
Total (47)	22.504		

Coefficiente de determinación : 0,9783

Error estándar de la estimación : 1,65 MPa

Límite 95% confianza : 3,3 MPa

Coefficiente Durbin – Watson : 1,3950

Cabe destacar que los 9 parámetros estimados, tienen un Valor P igual o inferior a 0,01, lo que quiere decir que todos son significantes en la regresión con un 99% de confiabilidad. Del análisis de varianza del modelo se concluye que éste resulta ser estadísticamente significativo con un 99% de confiabilidad, puesto que su Valor P es también inferior a 0,01. Asimismo, se puede sostener que el modelo explica en casi un 98% la variabilidad de R_{cu28} . El error estándar de la estimación es de 1,65 MPa y por consiguiente el intervalo para un 95% de confianza resulta ser 3,33 MPa, lo que es muy bueno. El análisis gráfico de residuos, realizado dado que el parámetro de la prueba de Durbin – Watson fue ligeramente inferior a 1,4, muestra que no hay tendencia alguna en los residuos por lo que se concluye que no existe correlación en ellos y el modelo adoptado es pertinente.

La Figura 4 presenta una comparación entre los valores medidos de la resistencia a compresión cúbica, a la

edad de 28 días y con curado húmedo, y los estimados a partir de la Fórmula 1.

Como se puede observar en la figura, la Fórmula 1 entrega una muy buena estimación para los valores de R_{cu28} . El error máximo de la estimación resulta ser de 3,6 MPa para el hormigón P2/38/30 y el error mínimo es nulo para el hormigón P2/38/66 y el mortero M38.

Cabe mencionar que la Fórmula 1 no tiene como objetivo estimar la resistencia a compresión de los morteros, puesto que el mecanismo de falla en estos casos es diferente. En los morteros, al igual que en los hormigones convencionales, la falla se produce en la zona de transición entre el árido y la pasta de cemento.

Con el fin de analizar la sensibilidad del modelo en función de las variables que intervienen, se presentan las Figuras 5, 6 y 7. En la Figura 5 se aprecia el efecto de la magnitud de la resistencia intrínseca de la fase liviana, expresada como el valor del 10% de finos, en la magnitud de la resistencia a compresión del hormigón. Para efecto de establecer comparaciones se ha asumido una resistencia a compresión de la fase soportante de 50 MPa y 5 diferentes volúmenes de árido liviano por m^3 de hormigón: 200, 300, 400, 500 y 600 lt/m^3 .

Como se aprecia en la Figura 5, el valor del 10% de finos es un parámetro altamente significativo en la resistencia a compresión del hormigón. Así, para un contenido de árido liviano de 200 lt/m^3 , la resistencia puede disminuir entre un 4 y un 20% para TPFV de 70 y 25 kN, respectivamente. Para mayores cantidades de fase liviana, el efecto de la resistencia propia del árido es aún mayor, disminuyendo la resistencia a compresión del hormigón entre un 40 y un 60% para dosis de árido liviano de 600 lt/m^3 .

Con el fin de establecer límites del árido liviano usado en aplicaciones estructurales, en cuanto a capacidad resistente y dosis, se presenta a modo de ejemplo la Figura 6 en que se grafica la Fórmula 1 para una fase resistente de 50,0 MPa y diferentes tipos y cantidades de árido liviano. En esta figura se observa que para una calidad de árido determinada, a medida que aumenta la dosis de árido liviano (expresada como volumen absoluto) disminuye la resistencia a compresión del hormigón; esta pérdida de resistencia es más pronunciada para hormigones con fase liviana más débil (menor TPFV).

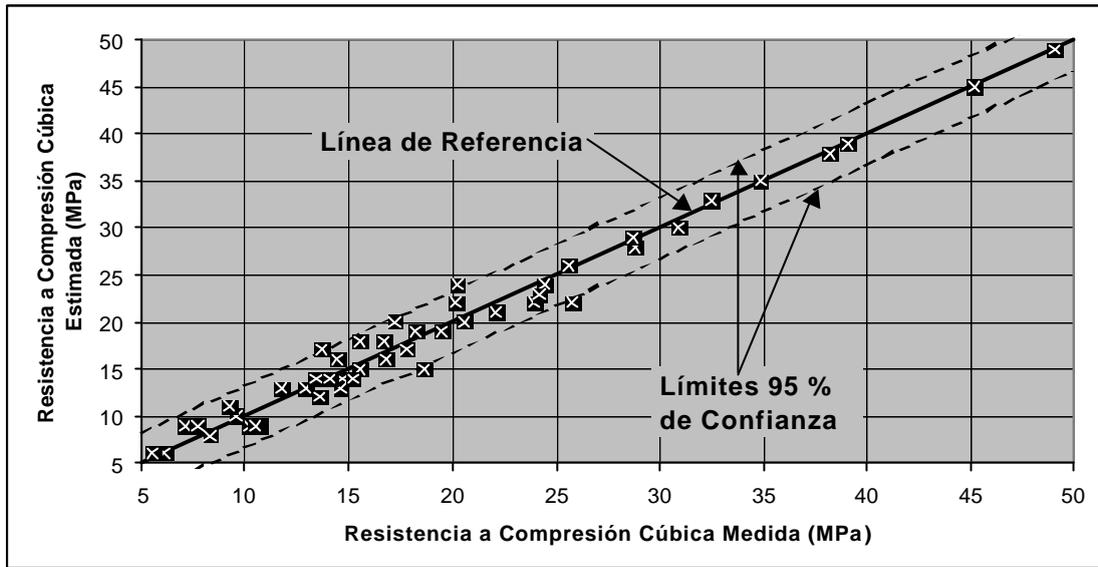


Figura 4. Valores de resistencia a compresión medidos versus estimados a partir de Fórmula 1.

En la curva correspondiente a un TPFV de 70 kN, que representa a los hormigones con arcilla expandida (TPFV=69 kN), se puede observar que con la fase soportante considerada siempre se obtienen hormigones livianos estructurales con una resistencia a compresión cúbica superior a 19,0 MPa. Igualmente, para un valor de TPFV de 55 kN, tampoco se observan limitaciones en el contenido de árido liviano para obtener un hormigón de resistencia estructural.

Por el contrario, para áridos livianos más débiles se encuentra un límite en la dosis máxima que es posible 400 lt/m^3 , respectivamente. Con dosificaciones superiores se

ACI 213R (1987). Por ejemplo, para áridos con TPFV de 40 y 25 kN, las dosis máximas recomendadas serían de 500 y utilizar para no bajar del límite de resistencia propuesto por estaría obteniendo una resistencia a compresión fuera del rango estructural.

A partir de los resultados anteriores es posible estimar la densidad mínima del hormigón que es posible obtener con un árido en particular, conocidos su densidad real en condición SSS y su dosis máxima. Esta es una información muy importante de tomar en consideración cuando se desea usar un árido liviano determinado en un proyecto.

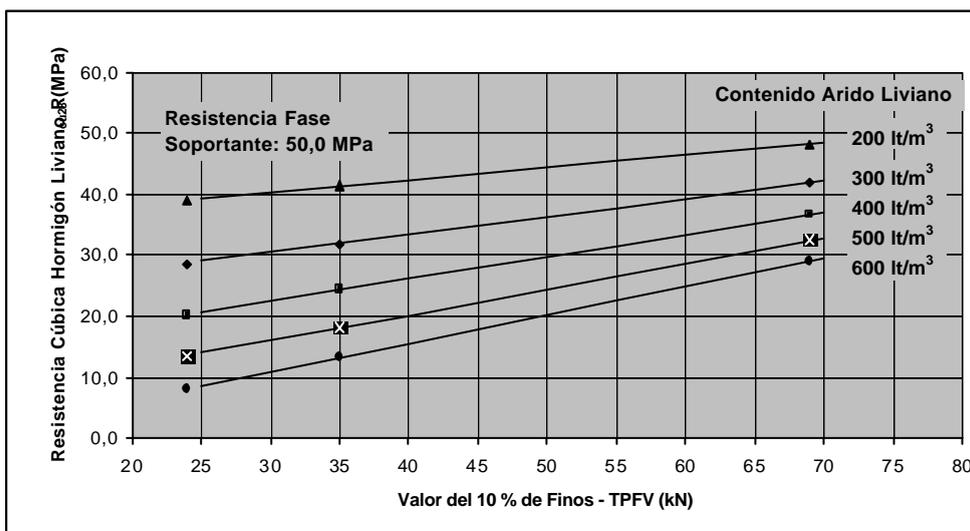


Figura 5. Relación entre la resistencia a compresión cúbica del hormigón y el valor del 10% de finos del árido en función del volumen absoluto de árido liviano utilizado.

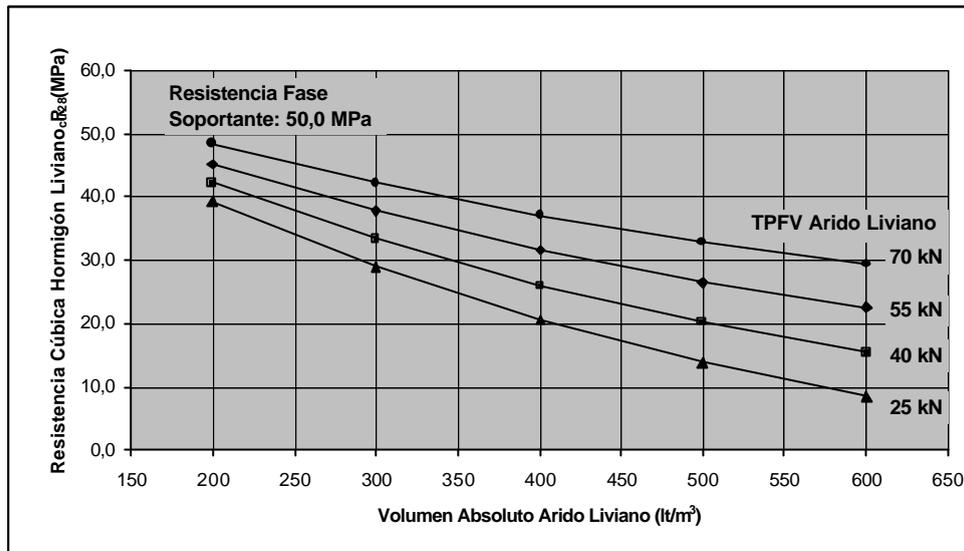


Figura 6. Relación entre la resistencia a compresión cúbica del hormigón y el volumen absoluto de árido liviano utilizado en función del valor del 10% de finos del árido.

Finalmente, la Figura 7 presenta la relación entre la resistencia a compresión del hormigón liviano y la resistencia a compresión de su fase soportante.

La figura ilustra la influencia de la cantidad de árido liviano (L) y de la resistencia a compresión de la fase soportante, en la resistencia a compresión cúbica estimada del hormigón. Así por ejemplo, si se especifica una resistencia a compresión cúbica del hormigón de 30 MPa y se considera adicionar 200 lt/m³ de árido liviano, se requeriría una resistencia de la fase soportante de 34 MPa para un árido con TPFV de 70 kN. Si la dosis de fase liviana aumenta a 600 lt/m³, se requeriría una fase soportante capaz de resistir más de 50 MPa. No sería técnicamente factible

producir un hormigón liviano con la resistencia especificada anteriormente, si se cuenta con un árido más débil (TPFV 40 kN) y con una dosis de 600 lt/m³ ya que la fase soportante debería resistir aproximadamente 115 MPa.

Finalmente, sería posible estimar la resistencia a compresión de un hormigón liviano conocida su dosificación, si se cuenta con una expresión que relacione la razón cemento/agua de la fase soportante con su resistencia a compresión, tal como la fórmula de Bolomey. Para el cemento particular usado en esta investigación se dedujo la expresión 2 y se indican los parámetros estadísticos obtenidos.

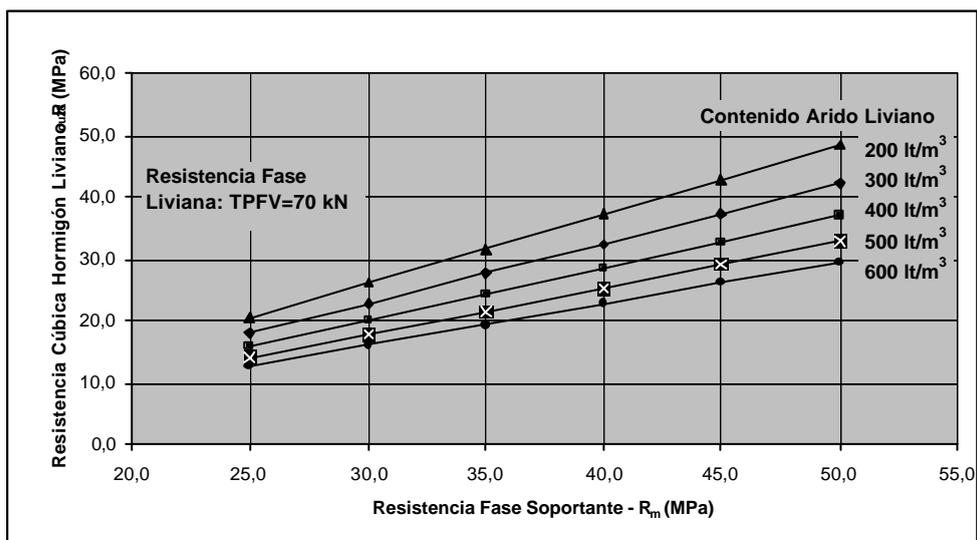


Figura 7. Relación entre resistencia a compresión del hormigón y de la fase soportante en función del volumen absoluto de árido liviano.

$$R_m = 21,5 * \left(\frac{C}{W}\right)^{0,488} \quad (2)$$

Con:

Coefficiente de determinación : 0,9814

Límite 95% confianza : 3,57 MPa

donde:

R_m : Resistencia a compresión cúbica a la edad de 28 días con curado húmedo de la fase soportante (MPa)

C/W : Razón cemento/agua

Se debe hacer notar que esta última ecuación es propia o característica de los cementos usados en la investigación, por lo que debería deducirse o adoptarse valores recomendados en normas para otros cementos.

Con las expresiones 1 y 2 es posible estimar la resistencia a compresión del hormigón liviano a partir de la dosis de cemento, agua y árido liviano utilizada y las características físicas y mecánicas de este último.

Con el objeto de validar las ecuaciones propuestas se realizó una comparación entre los resultados obtenidos en previas investigaciones (Videla y López, 1997 y Pfeiffer,

1968) y los estimados a partir de las expresiones 1 y 2. Las estimaciones de la resistencia a compresión de los hormigones resultaron ser satisfactorias quedando dentro de los límites presentados en la Figura 4.

4.2. Módulo de Elasticidad del Hormigón

El análisis de la rigidez del hormigón liviano se realizará siguiendo el mismo procedimiento utilizado en el punto 4.1 para la resistencia a compresión, es decir, se buscará determinar la influencia de la resistencia, rigidez y proporción de cada fase en la rigidez medida en el hormigón liviano.

La Figura 8 presenta el valor del módulo de elasticidad de los hormigones livianos, a 28 días de edad y en condición de temperatura y humedad normalizada, en función del contenido de fase liviana, y en que los resultados se han separado por tipo de fase liviana y soportante.

Como se aprecia en la figura y al igual de cómo sucede con la resistencia a compresión, la rigidez del hormigón disminuye al aumentar el contenido de fase liviana. Esto se explica al considerar que la fase liviana tiene una rigidez menor que la fase soportante, por lo cual un aumento de la primera produce una disminución de la rigidez del hormigón. Se aprecia además que a igual de contenido de árido liviano, a mayor índice resistente del árido, mayor es el

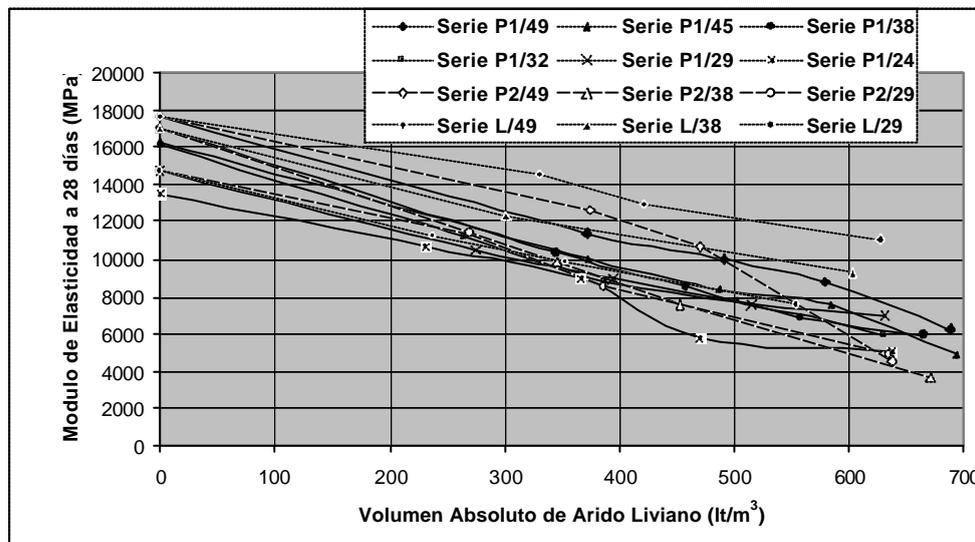


Figura 8. Rigidez del hormigón, expresada en el módulo de elasticidad, en función del tipo y volumen absoluto de árido liviano utilizado.

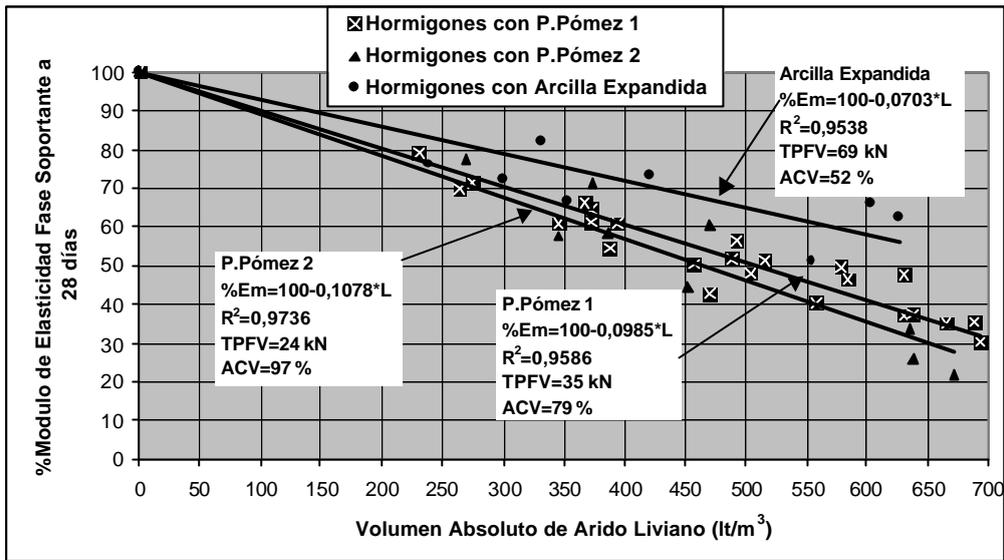


Figura 9: Regresión lineal entre la rigidez del hormigón expresada como % de la rigidez de la fase soportante, y volumen absoluto de árido liviano en función de sus características resistentes.

módulo de elasticidad. Asimismo se puede ver que a igual tipo de fase liviana, a mayor resistencia y rigidez de la fase soportante, mayor es la rigidez del hormigón.

En la Figura 9 se analiza el efecto de las propiedades mecánicas de la fase liviana en el módulo de elasticidad del hormigón, expresado este último como porcentaje del módulo de elasticidad de la fase soportante que lo constituye y en que se han diferenciado los hormigones por tipo de fase liviana.

Al igual como sucede en la Figura 3, es posible obtener tres regresiones lineales entre el valor del módulo de elasticidad del hormigón y el contenido de árido liviano,

cada una representativa del tipo de árido liviano considerado. Al comparar las regresiones se aprecia que a mayor resistencia de la fase liviana, menor es la pendiente de la recta de regresión.

Cabe destacar que si se realiza una regresión general para todos los hormigones, se obtiene un coeficiente de determinación de 0,8646, muy inferior a los valores obtenidos al considerar una regresión separada para cada tipo de árido liviano. De esta forma se concluye que para predecir el valor del módulo de elasticidad del hormigón, es recomendable formular un modelo que considere como variables de entrada las propiedades mecánicas y la

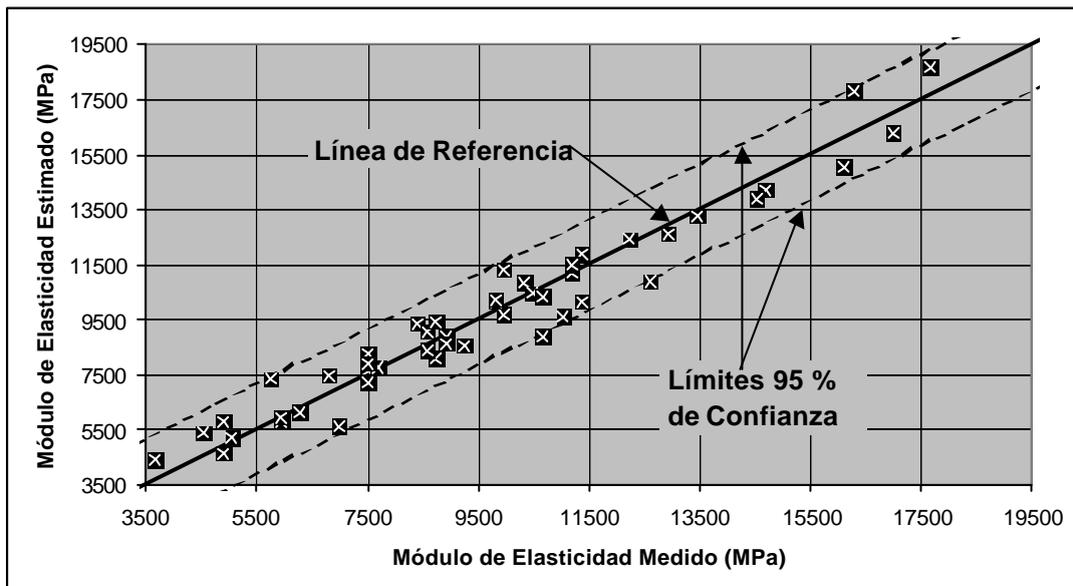


Figura 10. Valores de módulo de elasticidad medidos vers us estimados a partir de Fórmula 3.

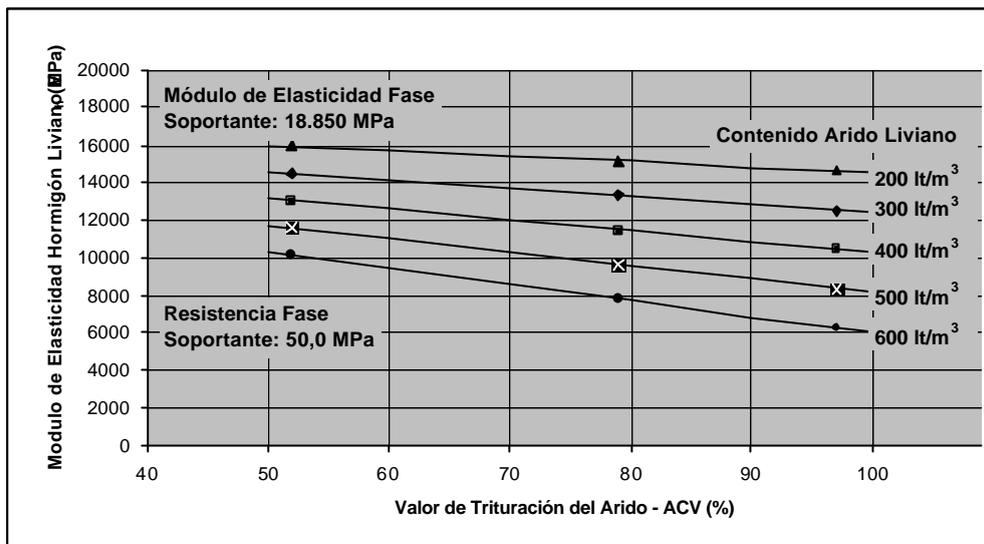


Figura 11. Relación entre el módulo de elasticidad del hormigón y el valor de trituración del árido en función del volumen absoluto de árido liviano utilizado.

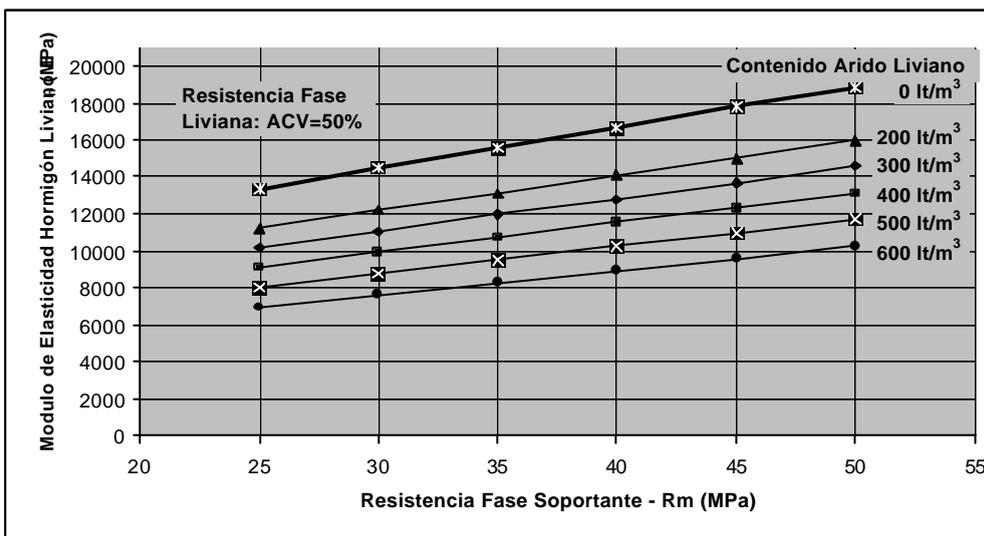


Figura 12. Relación entre el módulo de elasticidad del hormigón y la resistencia a compresión de la fase soportante en función de la cantidad de árido liviano.

proporción de cada fase constituyente. La Fórmula 3, obtenida a partir de un análisis estadístico, considera dichos factores. Todos los parámetros estadísticos se presentan en la Tabla 6.

$$E_h = d_0 + d_1 * L + d_2 * R_m + d_3 * L * R_m * ACV \quad (3)$$

Coefficiente de determinación : 0,9466
 Error estándar de la estimación : 816,8 MPa
 Límite 95% confianza: ± 1.647,8 MPa
 Coeficiente Durbin – Watson: 1,490

Tabla 6. Parámetros estadísticos de Fórmula 3.

Parámetro	Estimación	T - estadístico	Valor - P
d_0	7.968,04	11,0719	0,0000
d_1	7,10764	-5,24069	0,0000
d_2	217,607	11,5983	0,0000
d_3	0,00286366	-6,97552	0,0000
Análisis de Varianza			
Fuente (Grados Libertad)	Varianza	Cuociente F	Valor P
Modelo (3)	$5,06223 * 10^8$	252,93	0,0000
Residual (43)	$2,86867 * 10^7$		
Total (46)	$5,34909 * 10^8$		

Se debe destacar que el modelo originalmente consideró la rigidez de la fase soportante como variable de entrada en lugar de su resistencia a compresión. Durante el análisis estadístico se llegó a la conclusión que al utilizar la resistencia a compresión se obtenía una regresión con un coeficiente de determinación superior y un error de estimación menor. Se debe señalar que el reemplazo de la rigidez por la resistencia a compresión de la fase soportante es posible desde el punto de vista teórico, ya que se trata de dos propiedades relacionadas entre sí. Se debe señalar además que el valor de trituración del árido ACV, representa el grado de trituración experimentado por una muestra del árido al ser sometido a una carga estándar de 400 kN.

Los 4 parámetros estimados, tienen un Valor P inferior a 0,01, lo que quiere decir que todos son significativos en la regresión con un 99% de confiabilidad. Del análisis de varianza del modelo se concluye que éste resulta ser estadísticamente significativo con un 99% de confiabilidad, puesto que su Valor P es también inferior a 0,01.

Se puede sostener que el modelo explica en casi un 95% la variabilidad de E_h . El error estándar de la estimación es de 816,8 MPa y por consiguiente el intervalo para un 95% de confianza es $\pm 1.647,8$ MPa. El parámetro de la prueba de Durbin – Watson es superior a 1,4, lo que indica que no hay correlación entre los residuos y el modelo adoptado es pertinente.

La Figura 10 presenta una comparación entre los valores medidos del módulo de elasticidad del hormigón, a la edad de 28 días y con curado húmedo, y los estimados a partir de la Fórmula 3.

En las Figuras 11 y 12 se presenta un análisis de la sensibilidad del modelo propuesto, en función de las variables básicas que intervienen: las propiedades mecánicas y contenido del árido liviano y la resistencia a compresión de la fase soportante.

La Figura 11 muestra cómo la resistencia intrínseca de la fase liviana, expresada como el valor de trituración del árido, influye en la magnitud del módulo de elasticidad del hormigón liviano. En dicha figura se ha supuesto una resistencia a compresión de la fase soportante de 50 MPa y 5 contenidos diferentes de árido liviano: 200, 300, 400, 500 y 600 lt/m^3 .

La figura indica claramente que la resistencia de la fase liviana, expresada como el valor de trituración del árido, es una variable importante en la magnitud de la rigidez del hormigón. Por ejemplo, para una dosis de árido liviano de 200 lt/m^3 , la rigidez puede disminuir entre 15 y 23% de la correspondiente a la fase soportante, para áridos con ACV de 50 y 100%, respectivamente. A mayor dosis de árido liviano el efecto de su resistencia intrínseca sobre la rigidez es mayor; es así como para los mismos tipos de árido pero con una dosis de 600 lt/m^3 , la rigidez disminuye entre 45 y 68% de la rigidez de la fase soportante.

La Figura 12 muestra el efecto que tiene la resistencia de la fase soportante en el módulo de elasticidad del

hormigón. Como se aprecia en la figura, existe una relación creciente entre la resistencia a compresión de la fase soportante y el módulo de elasticidad resultante del hormigón, es decir, a mayor resistencia de la fase soportante, mayor es el módulo de elasticidad del hormigón. La relación es además aproximadamente lineal y depende fundamentalmente de la dosis de la fase liviana. Así, cuando no se utiliza árido liviano, un aumento de 25 MPa en la resistencia a compresión de la fase soportante reporta un aumento del módulo de elasticidad del hormigón de aproximadamente 5.500 MPa. Cuando se considera una dosis de 500 lt/m^3 de árido liviano dicho aumento de resistencia trae consigo un aumento de sólo 3.600 MPa. Se deduce entonces que el efecto de la resistencia a compresión de la fase soportante en la rigidez disminuye a medida que disminuye su proporción en el hormigón.

Se tiene entonces que con las expresiones 2 y 3 es posible estimar la rigidez del hormigón liviano conocidas las proporciones de sus materiales constituyentes y las propiedades físicas y mecánicas del árido grueso liviano.

4.3. Comparación del Módulo de Elasticidad del Hormigón Liviano con Estimaciones de Normativas

Se han desarrollado modelos para estimar la rigidez del hormigón, los que consideran en los cálculos propiedades, tales como: resistencia a compresión y densidad del hormigón. Las Fórmulas 4, 5 y 6 presentan las expresiones propuestas por el American Concrete Institute (ACI 318, 1995), el Comité Europeo del Hormigón (CEB, 1978) y el Instituto Británico de Estandarización (BSI, CP110, 1972), respectivamente:

$$E_h \approx 0,04298 * \sqrt[3]{D^2} * \sqrt[2]{R_{cil}} \quad (4)$$

$$E_h \approx 0,00165 * D^2 * \sqrt[3]{R_{cil}} \quad (5)$$

$$E_h \approx 0,00172 * D^2 * \sqrt[3]{R_{cu}} \quad (6)$$

donde:

E_h : Módulo de elasticidad estándar del hormigón liviano (MPa)

R_{cu} : Resistencia a compresión cúbica del hormigón liviano (MPa)

R_{cil} : Resistencia a compresión cilíndrica del hormigón liviano (MPa)

D : Densidad del hormigón endurecido en condición húmeda (kg/m^3)

La Figura 13 presenta una comparación entre los valores estimados por cada una de las expresiones anteriores y los valores reales medidos. Todas las estimaciones de E_h se basan en los valores obtenidos de resistencia a compresión (ya sea cúbica o cilíndrica, según corresponda) y densidad en condiciones de curado húmedo.

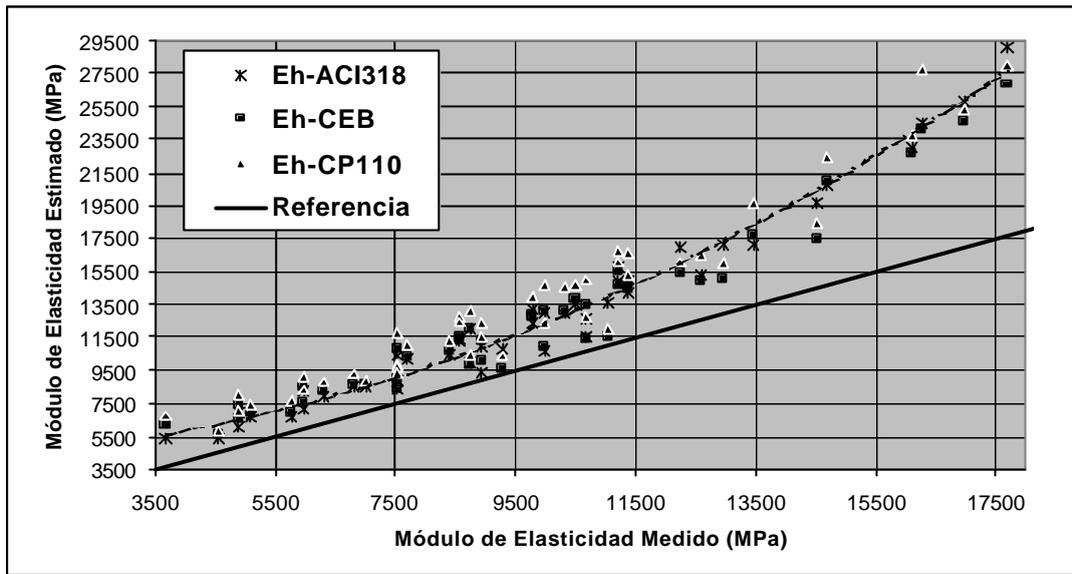


Figura 13. Valores de E_h estimados a partir de expresiones de ACI (1995), CEB (1978) y CP110 (1972) versus valores medidos.

Como se puede observar en la figura, la gran mayoría de los valores estimados están alejados de la línea de referencia que representa la igualdad; todas las expresiones propuestas sobrestiman los valores del módulo de elasticidad del hormigón. Al hacer un análisis de varianza a cada expresión se tiene que para todas las expresiones, la varianza residual del modelo es mayor que la varianza propia de E_h . Se debe señalar que el error de estimación crece al aumentar el valor de E_h , es decir, para los morteros u hormigones de mayor densidad y/o resistencia el error aumenta. Dicho efecto

se grafica por medio de la curva de regresión mostrada en la figura, la que se aleja de la línea de referencia a medida que aumenta el valor del módulo de elasticidad.

Esta sobrestimación podría explicarse en parte por el hecho de que las tres expresiones consideran la variable densidad (D) elevada a un exponente mayor que uno, siendo que el efecto de dicha variable podría ser del tipo lineal. Otro factor que podría explicar dicha diferencia es el agua absorbida por el hormigón, ya que al considerar la densidad húmeda en hormigones con alta capacidad de absorción de

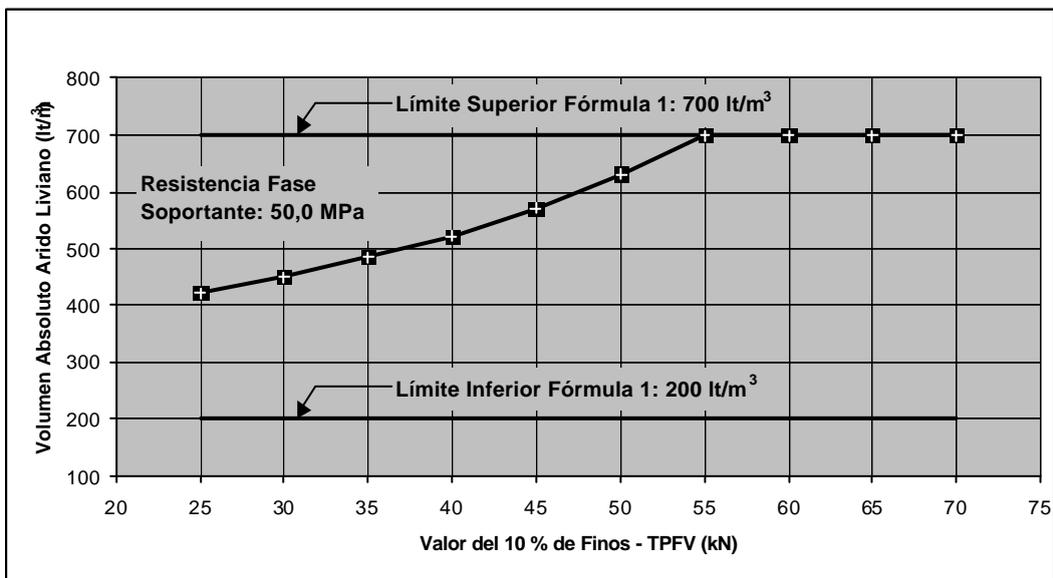


Figura 14. Contenido admisible de árido liviano en función de su capacidad resistente para obtener hormigón liviano estructural.

agua en su estructura, se está incluyendo un alto contenido de agua que no contribuye de manera alguna al aumento del módulo de elasticidad del hormigón.

Por lo anterior se concluye que las fórmulas propuestas no sirven para caracterizar esta propiedad en el caso de hormigones livianos. De esta forma, se hace necesario derivar una expresión para el valor de E_h del hormigón liviano, con el fin de reducir el error de estimación. A partir de un análisis estadístico se concluye que la Fórmula 7 es la mejor expresión para la estimación del módulo de elasticidad del hormigón, a 28 días y curado en condiciones normalizadas, en función de su resistencia a compresión y densidad. La Tabla 7 presenta los parámetros estadísticos relevantes.

$$E_h = f_1 * D * \sqrt{R_{cu28}} \quad (7)$$

Coefficiente de determinación : 0,9597
 Error estándar de la estimación : 684,9 MPa
 Límite 95% confianza : 1.384,2 MPa
 Coeficiente Durbin – Watson : 1,363

donde:

E_h : Módulo de elasticidad estándar del hormigón liviano, a 28 días de edad y con curado húmedo (MPa)

R_{cu28} : Resistencia a compresión cúbica del hormigón liviano, a 28 días de edad y con curado húmedo (MPa)

D : Densidad del hormigón endurecido en condición húmeda (kg/m^3)

Los parámetros estadísticos indican que la regresión explica casi un 96% de la variabilidad de E_h , tanto el coeficiente “ f_1 ” como la regresión son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 99%. El error estándar de la estimación es 684,9 MPa, teniéndose un intervalo, para un 95% de confianza, de 1.384,2 MPa. El resultado de la prueba de Durbin – Watson es 1,363, que al ser menor que 1,4 indica que podría haber correlación en los residuos, pero al realizar un análisis gráfico de éstos no se advierte tendencia alguna, concluyéndose, por lo tanto, que el modelo propuesto es correcto.

Los errores máximos de estimación son de 2.282 y 1.511 MPa para los morteros M45 y M49, respectivamente, el error mínimo de estimación se registra para el hormigón L/49/43 y es de 17 MPa. Por el hecho de que sean los morteros M49 y M45 los que presentan los mayores errores de estimación, podría pensarse que la regresión mejoraría si se consideran solamente los hormigones livianos. Al realizar una regresión sólo para estos últimos, se obtiene un valor para el coeficiente “ f_1 ” de la Fórmula 7 de 1,314 muy similar al obtenido considerando los morteros (1,298) y el coeficiente de determinación toma un valor de 0,9527, lo que casi no difiere del valor 0,9597 obtenido con los morteros. Por lo anterior, se concluye que es correcta la inclusión de los morteros, ya que no alteran la regresión de manera significativa.

Sin lugar a dudas la expresión propuesta representa de mejor manera la relación entre E_h y las variables R_{cu28} y D , para los datos analizados, en comparación con las expresiones propuestas por el ACI, CEB y CP110.5.

Tabla 7. Parámetros estadísticos de Fórmula 7

Parámetro	Estimación	T – estadístico	Valor – P
f_1	1,2976	102,2551	0,0000
Análisis de Varianza			
Fuente (Grado Libertad)	Varianza	Cuociente F	Valor P
Modelo (1)	4,9046E9	10.456,1	0,0000
Residual (46)	2,1577E7		
Total (41)	4,9265E9		

5. CONCLUSIONES

Como primera conclusión se debe mencionar que la conceptualización del hormigón con áridos livianos como un material de dos fases (una fase soportante y otra liviana), resulta altamente conveniente para explicar y describir las propiedades del hormigón con áridos livianos en estado endurecido y se presenta como una buena herramienta para incentivar el desarrollo y uso del hormigón con áridos livianos. Se trata de hormigones que poseen una fase liviana débil que determina las propiedades mecánicas, por lo que la interfase o zona de transición podría no ser considerada.

Se puede concluir que se han derivado ecuaciones que permiten predecir, con un muy buen nivel de confianza, la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de hormigones livianos en función de la resistencia y dosis de cada fase. Además se ha determinado un índice para caracterizar la capacidad estructural del árido liviano, de fácil medición y que tiene una muy buena correlación con las propiedades mecánicas del hormigón liviano.

A edades tempranas la resistencia a compresión de la fase soportante podría ser menos resistente o rígida que la fase liviana y por lo tanto controlar el mecanismo de falla. De esta manera las fórmulas 1 y 3 podrían no ser aplicables a hormigones livianos a temprana edad.

Es importante tener en cuenta el rango de aplicación de las relaciones obtenidas. Si estas son aplicadas fuera de los rangos definidos en la etapa experimental, las ecuaciones y relaciones propuestas no aseguran una buena estimación de las propiedades mecánicas del hormigón. Los rangos más importantes en el árido liviano son: TPFV del árido liviano entre 25 y 70 kN y un contenido entre 200 y 700 lt/m^3 . En la fase soportante una resistencia a compresión entre 24 y 50 MPa.

De la información proporcionada se puede concluir que es factible la elaboración de hormigones livianos estructurales con cualquiera de los tres áridos considerados. Sin embargo, la arcilla expandida presenta ventajas sobre la piedra pómez. A dosificaciones similares, los hormigones con arcilla expandida siempre superan la resistencia a compresión medida en los hormigones con piedra pómez. En promedio los hormigones con piedra pómez presentaron una resistencia a compresión de un 57% de los valores obtenidos con arcilla expandida.

Como se mencionó, el ACI propone una resistencia a compresión mínima para que un hormigón liviano sea utilizado con fines estructurales, dicho límite expresado en resistencia a compresión cúbica tiene un valor de 19,0 MPa. De esta manera la Figura 14 muestra a modo de ejemplo, basándose en la Fórmula 1, el contenido máximo admisible de árido liviano para cumplir los requisitos del ACI con una fase soportante de 50 MPa y diferentes características resistentes de árido liviano.

Como se aprecia en la figura, mientras más débil es el árido liviano menor será su dosis máxima admisible si se quiere obtener una resistencia a compresión superior a 19,0 MPa. Al limitar el contenido volumétrico del árido liviano se limita además la densidad mínima que es posible obtener para el hormigón liviano. Generalmente en un proyecto se

especifica la resistencia a compresión y la densidad del hormigón. Con ayuda de la Figura 14 es posible evaluar si un árido determinado es o no capaz de dar origen a un hormigón que cumpla ambos requisitos.

Finalmente el trabajo ha permitido la proposición de una nueva relación para estimar el módulo de elasticidad del hormigón liviano en función de su resistencia y densidad.

6. REFERENCIAS

- HOLM, T. (1995), *Lightweight Concrete and Aggregates*. American Standard Testing and Materials (ASTM), Standard Technical Publication STP 169C.
- LOPEZ, M. (1999), *Proposición de una Metodología de Dosificación de Hormigones Estructurales con Áridos Livianos*. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- PFEIFER, D. (1968), *Sand Replacement in Structural Lightweight Concrete – Creep and Shrinkage Studies*. Journal of the American Concrete Institute (ACI), Title N°65-11, Febrero 1968. pp 131-139.
- VIDELA, C. Y LOPEZ, M. (1997), *Hormigones Livianos Estructurales con Piedra Pómez - Estudio de Prefactibilidad Técnica*. Informe Técnico HPP 97-04, Agosto 1997, Santiago.
- WEIGLER, H. (1974), *Hormigones Ligeros Armados*. Editorial Gustavo Gili, Barcelona.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1986). ASTM C39-86, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Specimens. ASTM U.S.A. (1986)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1981). ASTM C138-81, Standard Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM U.S.A. (1981)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1990). ASTM C143-90a, Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. ASTM U.S.A. (1990)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1978). ASTM C173-78, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method. ASTM U.S.A. (1978)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1987). ASTM C469-87a, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM U.S.A. (1987)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991). ASTM C567-91, Standard Test Method for Unit Weight of Structural Lightweight Concrete. ASTM U.S.A. (1991)
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1987). ACI 213R-87, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. ACI U.S.A. (1987)
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995). ACI 318-95, Standard Building Code. ACI U.S.A. (1995)

BRITISH SATANDARD INSTITUTE (1975). BS 812:
PART 3, Methods for sampling and testing of mineral
aggregates, sand and fillers, Part 3. BSI U.K. (1975)
BRITISH SATANDARD INSTITUTE (1972). BSI
Concrete Practice 110 (CP110). BSI U.K. (1975)
COMITE EUROPEO DEL HORMIGON (1978). Código
CEB-FIP para Hormigón Estructural. CEB (1978)
INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION (1985)
NCh 170.Of 85, Hormigón - Requisitos Generales. Chile
(1987)

Carlos Videla C.
Ingeniero Civil, Ph.D.
*Profesor, Departamento Ingeniería y Gestión de la
Construcción.
Pontificia Universidad Católica de Chile.
Jefe Laboratorio RESMAT
DICTUC S.A.*

*Civil Engineer, Ph.D.
Professor, Department of Construction Engineering and
Management
Pontificia Universidad Católica de Chile.
Head of Material's Strength Laboratory
DICTUC S.A.
cvidela@ing.puc.cl*

Mauricio López C.
Ingeniero Civil M.Sc.
Profesor, Departamento de Ingeniería y Gestión de la
Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile

*Civil Engineer, MSc
Professor, Department of Construction Engineering and
Management
Pontificia Universidad Católica de Chile.
mlopez@ing.puc.cl*