

DOSIFICACION DE HORMIGONES LIVIANOS

Por Carlos Videla C. y Mauricio López C.

Resumen

Los hormigones livianos (HL) han sido utilizados en muchas obras desde la segunda mitad del Siglo XX, debido a que en ciertas aplicaciones son una alternativa conveniente respecto a los hormigones convencionales. Sin embargo, el desarrollo de su tecnología ha sido limitado porque su estudio ha estado enfocado principalmente a resolver casos particulares. El objetivo del presente trabajo fue, por lo tanto, desarrollar un procedimiento general de dosificación de hormigones con áridos livianos aplicable a una gran variedad de áridos y situaciones. El método modela al hormigón con áridos livianos como un material de dos fases, una denominada "soportante", constituida por mortero normal y otra "liviana", formada por árido grueso liviano. La primera aporta la resistencia estructural y la segunda disminuye el peso propio del hormigón.

El diseño del experimento 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 el efecto de los factores más importantes sobre las propiedades del hormigón liviano. Se realizó ensayos de compresión cúbica y cilíndrica y ensayos de módulo de elasticidad a diferentes edades, así como también ensayos de densidad, resistencia y rigidez en estado seco al aire a 28 días. En estado fresco se realizó la medición de trabajabilidad con diferentes métodos, densidad y contenido de aire.

A partir de los resultados se proponen relaciones entre las variables de dosificación y las de diseño: trabajabilidad, resistencia a compresión y densidad del hormigón. Asimismo, se determina que el índice que caracteriza mejor la capacidad estructural del árido liviano es el valor del 10% de finos definido en las normas británicas.

1. INTRODUCCION

Los hormigones livianos se definen en ACI 213R (1987) como aquellos que poseen una densidad en estado seco al aire menor a 1.850 kg/m^3 , y pueden dividirse en tres tipos: los hormigones aireados, que se fabrican con aditivos espumantes, los hormigones sin finos y los hormigones con áridos livianos. Estos últimos consideran el reemplazo parcial (fracción gruesa) o total del árido normal por otro de menor densidad. Con el uso de áridos livianos de origen artificial se ha logrado fabricar hormigones con alta resistencia a compresión y baja densidad (Canovas, 1996). De esta manera surge el concepto de

hormigón liviano estructural, el que se describe en ACI 213R (1987) como aquellos hormigones livianos con una resistencia a compresión cúbica superior a 21,5 MPa.

Los hormigones livianos estructurales presentan, 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, presentan un mejor comportamiento térmico que se traduce en una menor deformabilidad ante cambios de temperatura y tienen mejores propiedades de aislación térmica y acústica.

Las propiedades del hormigón con áridos livianos dependen en gran medida de la cantidad y propiedades del árido particular que se esté utilizando, así como también de los otros componentes del hormigón (dosis de cemento, agua, granulometría), por lo que es posible inferir que el uso de un determinado árido liviano no define en sí las propiedades del hormigón. Gran parte de su desarrollo se ha concentrado en la arcilla y Pizarra expandidas, áridos con los que se han logrado las mejores propiedades mecánicas. Al aplicar a otros tipos de áridos las dosificaciones propuestas, se observan grandes diferencias.

Como consecuencia de lo anterior, la tecnología de los hormigones livianos no ha llegado a los mismos niveles de conocimiento y desarrollo que la tecnología del hormigón tradicional. Se hace importante contar, por lo tanto, con una tecnología adecuada para el diseño y fabricación de hormigones livianos. Para tal efecto es de gran importancia desarrollar, entre otras cosas, métodos de dosificación adecuados para hormigones a base de áridos livianos disponibles en el país y procedimientos o métodos para predecir sus propiedades. En particular en este proyecto se propuso analizar el uso de áridos livianos como la piedra pómez que se encuentra en vastos depósitos a lo largo de Chile.

El objetivo principal fue desarrollar una metodología general de dosificación para hormigones livianos, que considere las variables objetivo: densidad, trabajabilidad y resistencia especificadas. El procedimiento experimental consistió en cuantificar el efecto de las variables de dosificación en las propiedades de interés del hormigón liviano. Además, el método no se circunscribe a un árido en particular, por el contrario, tiene el objetivo de ser aplicable a cualquier tipo de árido liviano, ya que utiliza parámetros generales que describen física y mecánicamente el árido en uso.

2. ANALISIS DE LA RELACION ENTRE VARIABLES OBJETIVO Y DE DOSIFICACION EN HORMIGONES LIVIANOS

Un método de dosificación tiene por objeto ser una guía para determinar las proporciones de los materiales componentes del hormigón, de manera que sus propiedades cumplan con ciertos requisitos.

En los hormigones normales, son dos las propiedades principales que interesa definir para un método de dosificación: trabajabilidad y resistencia a compresión. La primera queda determinada por los requisitos de construcción y la segunda es una propiedad de diseño. La trabajabilidad depende principalmente de la dosis de agua y granulometría de los áridos, y la resistencia de la razón agua/cemento.

En los hormigones livianos aparece una tercera variable que interesa controlar, una nueva propiedad objetivo, la densidad del hormigón. Esta propiedad a su vez influye en otras propiedades como: resistencia, módulo de elasticidad, conductividad térmica, etc.

En la bibliografía sobre hormigones livianos es posible encontrar gran cantidad de investigaciones orientadas a la obtención de una dosificación para ciertos objetivos específicos (López, 1999). Estas investigaciones no tienen por meta proponer un método de dosificación, sino más bien dar a conocer ciertos áridos y sus posibilidades de uso. Se transforman así, en una guía preliminar al momento de fabricar un hormigón con un árido en particular.

También es posible encontrar investigaciones que proponen relaciones entre variables de dosificación y propiedades del hormigón. Aquí es posible diferenciar dos grupos: el primero formado por investigaciones que especifican un árido en particular, para el cual presentan, por ejemplo, relaciones entre contenido de cemento y resistencia; estas relaciones tienen el inconveniente de ser aplicables sólo a dicho material. En el segundo grupo se distinguen investigaciones que presentan relaciones generales, sin limitarse a un árido en particular. Dichos estudios no consideran de manera alguna las propiedades específicas del árido utilizado, por lo tanto, dan resultados dentro de rangos muy amplios y que muchas veces se contraponen con las recomendaciones particulares (López, 1999).

En resumen, se encuentran muy pocos investigadores que apunten a sistematizar un procedimiento de dosificación para hormigones livianos y que sea utilizable en una gran gama de áridos y aplicaciones.

Un método de dosificación para hormigones livianos debe determinar las cantidades de cada material base, de manera que se obtengan las propiedades objetivo buscadas en el hormigón (densidad, trabajabilidad y resistencia). Además, las propiedades del árido liviano utilizado impondrán ciertos límites en el hormigón. Por esto, un método de dosificación de hormigones con áridos livianos debe ser capaz de determinar si el árido seleccionado es apto o no para los requerimientos del hormigón.

a) Densidad

La densidad del hormigón puede ser considerada como la propiedad fundamental, ya que, además de definir el peso que tendrá el material por unidad de volumen, influye directamente en una serie de otras propiedades, como resistencia, rigidez, conductividad térmica y acústica, trabajabilidad, etc.

La humedad juega un importante papel en la densidad que presenta el hormigón liviano, ya que tienen una capacidad importante de absorción de agua. Este efecto debe ser considerado al especificar y medir la densidad del hormigón. La norma ASTM C567 (1991) establece un procedimiento de medición de la densidad en estado endurecido, que define un estado de humedad estándar para su cálculo. Así surge el concepto de "densidad seca al aire" ("air dry density").

La elevada absorción que presentan los áridos livianos plantea también un desafío desde el punto de vista de la fabricación y manejo del hormigón. Por una parte, un error en la estimación de la humedad del árido puede producir grandes variaciones en la dosis de agua libre y con ello variaciones en las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido. Por otra parte, el empleo de áridos en estado seco puede traer como consecuencia una rápida pérdida de trabajabilidad durante el transporte, colocación y compactación del hormigón, ya que el árido liviano absorberá rápidamente el agua de amasado.

b) Trabajabilidad

La trabajabilidad de un hormigón puede ser definida como la facilidad que presenta, en estado fresco, para ser mezclado, transportado, colocado y compactado sin perder homogeneidad (sin segregarse). Dicha trabajabilidad está representada por dos variables, fluidez y consistencia, las que pueden ser evaluadas de diversas formas (Kosmatka y Panarese, 1992).

En el caso de los hormigones livianos se puede decir que el concepto de trabajabilidad seguirá siendo el mismo, pero se presentan diferencias considerables en la forma de medir e interpretar la trabajabilidad.

En la literatura se encuentran diferentes opiniones con respecto al uso de métodos convencionales para medir trabajabilidad en hormigones livianos (López, 1999).

Se tiene, por una parte, que el American Concrete Institute recomienda utilizar el método del asentamiento de cono de Abrams para determinar la dosis de agua requerida para hormigones normales y livianos (ACI 211.1, 1981; ACI 211.2, 1991). Cabe destacar que las tablas recomendadas en ambos documentos son idénticas, de lo que se infiere que no habría ninguna diferencia entre la trabajabilidad de hormigones livianos y normales. Además, las tablas entregan datos muy generales, con amplios rangos de asentamiento para una dosis particular de agua.

Por otra parte, es posible encontrar diversos autores que resaltan diferencias entre los resultados con el asentamiento de cono de Abrams para cada tipo de hormigón (Short y Kinniburgh, 1967; Neville y Brooks, 1990; Pellicer 1989).

En síntesis, en la definición de la trabajabilidad de hormigones livianos la densidad del hormigón fresco sería un factor importante. Sin embargo, hasta la fecha no habría un método universalmente aceptado para caracterizar la trabajabilidad del hormigón liviano.

c) Resistencia

La resistencia a compresión en un hormigón convencional depende fundamentalmente de la resistencia de la pasta de cemento y de la interfase pasta – árido. La resistencia de la pasta de cemento, a su vez, está determinada por la razón agua/cemento (W/C) y la clase o tipo de cemento utilizado. En este tipo de hormigones las propiedades del árido no interesan desde el punto de vista mecánico, ya que por lo general su resistencia y rigidez son superiores a los de la pasta.

Las propiedades mecánicas de los hormigones con áridos livianos, a diferencia de los convencionales, dependen, entre otras variables, de las propiedades y cantidad de los áridos utilizados en su fabricación. Los áridos livianos tienen 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.

Es así como Holm (1995) plantea la existencia de una resistencia límite o techo (“ceiling strength”), la que define como aquella resistencia a partir de 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 dis-

tribución de la porosidad, como también de las características resistentes del material que envuelve los poros.

Por lo anteriormente indicado, el hormigón con áridos livianos puede ser modelado 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 del hormigón dependerá entonces de la resistencia y proporción de cada una de las fases. 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 actúan como puntos débiles, aun teniendo una elevada resistencia propia. El concepto de las dos fases puede ser aplicado porque la interfase no sería un factor limitante de la resistencia de este tipo de hormigones.

Además, los sistemas tradicionales de dosificación, en los cuales se relaciona la resistencia del hormigón con su razón agua/cemento (W/C), pierden validez para el hormigón liviano ya que no consideran las particularidades mecánicas del árido utilizado.

Para caracterizar la resistencia intrínseca del árido se cuenta con diversas alternativas. Existen metodologías directas, como ensayo a compresión o hendimiento en una probeta del material. Para ellos se requieren probetas de ciertas dimensiones mínimas, las que no siempre son posibles de obtener (Weigler, 1974). Otras formas indirectas de medir dicha resistencia son propuestas 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.

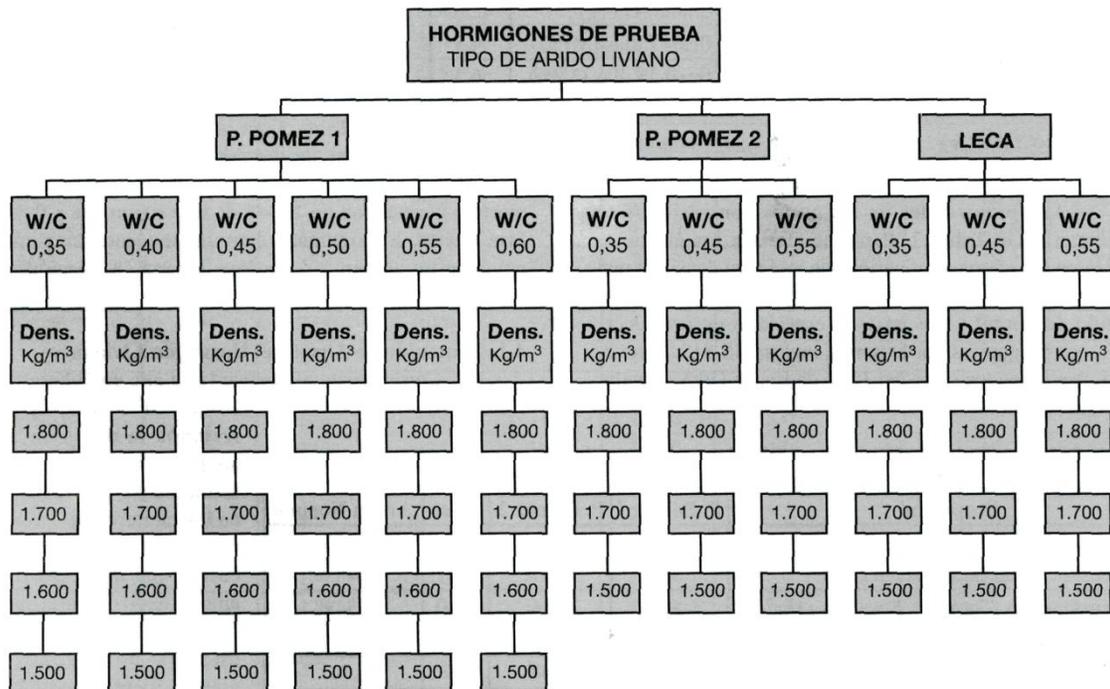


Figura 1. Diseño del Experimento.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se propuso un diseño de experimento, basado en el concepto de las dos fases, para determinar la influencia de las variables de dosificación en las variables objetivo del hormigón liviano (densidad, trabajabilidad y resistencia). El programa contempló seis tipos de fase soportante, en las que se varió su resistencia a compresión y trabajabilidad. Además tres tipos de fase liviana fueron considerados, dos de piedra pómez de diferentes características y procedencia, denominadas como pómez 1 (Arica) y pómez 2 (Valdivia) y un tercer tipo de fase liviana constituida de arcilla expandida (Leca - Argentina). La Figura 1 presenta el diseño del experimento utilizado en el estudio, donde es posible distinguir tres ramas principales para cada tipo de árido liviano considerado. Dentro de cada tipo de árido es posible apreciar hormigones con diferentes razones agua/cemento (W/C) y densidades en estado fresco expresadas en kg/m^3 .

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 corriente (Melón y Polpaico). La Tabla 1 muestra las propiedades del cemento obtenido.

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

Propiedad		Valor	Propiedad		Valor
Agua de Consistencia Normal (cm^3)		32,0	Densidad Real (kg/m^3)		2,922
			Finura Blaine (cm^2/g)		4,365
Tiempo	inicial	4:00	Resist. flexo 7 días (MPa)		4,5
Fraguado (h)	final	6:00	Resist. flexo 28 días (MPa)		6,3
Contenido Puzolana (%)		28,9	Resist. Compr. RRilem7 (MPa)		23,9
Contenido Yeso (%)		5,3	Resist. Compr. RRilem28 (MPa)		33,2

Las propiedades de los áridos considerados se presentan en la Tabla 2. Para caracterizar los áridos se realizaron 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).

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

Propiedad	P. Pómez 1	P. Pómez 2	Leca	Arena Normal
Densidad Real SSS: DRSSS (kg/m^3)	1.245	1.228	1.120	2.556
Densidad Real Seca: DRseca (kg/m^3)	887	573	982	2.483
Densidad Ap. Compact. Seca: Dacs (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
Valor del 10% de finos: TPFV(kN)	35	24	69	-
Valor de Trituración: ACV (%)	79	97	52	-

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 usada 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 razón agua/cemento de la fase soportante multiplicada por 100 (35, 40, 45, 50, 55 y 60) y finalmente un número que representa la densidad del hormigón con valores de 1.8, 1.7, 1.6 y 1.5 Ton/m^3 , respectivamente.

A cada mezcla se le realizó diferentes ensayos en estado fresco, entre los que destacan medición de trabajabilidad con el método 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 3 probetas cilíndricas (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). 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. El proporcionamiento de cada mezcla de prueba y sus principales resultados se presenta en la Tabla 3.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados de los ensayos realizados a cada mezcla de prueba se presentan en la Tabla 3, en la que 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, los siguientes hormigones muestran paulatinamente un aumento de la fase liviana en relación a la soportante.

4.1. Contenido de Aire en el Hormigón Liviano

Con respecto al contenido de aire en el hormigón liviano, los resultados indican que en los hormigones livianos la dosis de aire atrapado no es significativamente mayor que la medida en los morteros de densidad normal. Se debe tener en cuenta que la medición de aire se realizó con el método volumétrico recomendado para hormigones livianos. El método convencional utiliza aire a presión y sobrestima dicho valor en

Tabla 3. Proporcionamiento y resultados de las mezclas de prueba.

Tipo	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	Al (kg/m ³)	An (kg/m ³)	Df (kg/m ³)	s (cm)	Y _{airg} (l/m ³)	R _{cp28} (MPa)	Ds (kg/m ³)
M35	853	299	0	952	2.104	2,0	17	49,1	2.060
P1//35/1.8	538	188	463	600	1.789	10,5	12	25,6	1.682
P1//35/1.7	460	163	613	513	1.749	26,5	17	15,5	1.608
P1//35/1.6	351	123	721	393	1.588	9,5	43	14,7	1.425
P1//35/1.5	261	91	856	291	1.499	12,0	19	10,2	1.309
P2//35/1.8	555	194	459	620	1.828	0,0	55	25,8	1.657
P2//35/1.7	455	159	577	509	1.700	0,0	68	18,6	1.501
P2//35/1.5	256	90	784	287	1.417	0,0	60	6,1	1.181
L/35/1.8	580	203	371	648	1.802	0,5	28	39,1	1.732
L/35/1.7	494	173	471	552	1.690	0,5	30	34,9	1.639
L/35/1.5	342	120	702	382	1.546	0,0	45	28,8	1.454
M40	702	281	0	1.147	2.130	0,0	80	45,2	2.081
P1/40/1.8	431	172	464	703	1.770	12,0	14	20,2	1.626
P1/40/1.7	366	147	608	598	1.719	19,0	18	13,7	1.530
P1/40/1.6	286	115	727	467	1.595	10,0	18	12,9	1.408
P1/40/1.5	212	85	863	347	1.507	12,5	20	7,1	1.270
M45	696	313	0	1.085	2.094	5,5	20	38,2	2.048
P1//45/1.8	455	205	431	709	1.800	18,0	13	20,1	1.663
P1/45/1.7	380	171	570	591	1.712	14,0	13	16,8	1.544
P1/45/1.6	295	132	695	459	1.581	15,0	20	11,7	1.382
P1/45/1.5	217	98	828	337	1.480	3,0	16	10,6	1.328
P2/45/1.8	467	210	425	728	1.830	13,5	15	17,2	1.606
P2/45/1.7	388	174	556	604	1.722	12,5	13	14,1	1.474
P2/45/1.5	231	104	824	361	1.520	14,0	20	5,5	1.157
L/45/1.8	480	216	337	748	1.781	11,0	15	30,9	1.669
L/45/1.5	283	127	675	440	1.525	0,0	15	22,1	1.388
M50	704	352	0	1.040	2.096	20,0	8	32,5	2.036
P1/50/1.8	504	248	329	744	1.825	14,5	15	23,9	1.716
P1/50/1.7	427	214	483	630	1.754	20,0	15	17,8	1.610
P1/50/1.6	340	170	628	503	1.641	15,5	15	14,6	1.496
P1/50/1.5	260	140	786	384	1.570	9,0	18	9,5	1.303
M55	705	388	0	980	2.073	25,0	17	28,7	1.978
P1/55/1.8	509	280	342	707	1.838	24,0	10	18,2	1.707
P1/55/1.7	416	228	490	577	1.711	24,0	10	15,5	1.536
P1/55/1.6	328	181	643	456	1.608	18,5	15	13,6	1.425
P1/55/1.5	260	140	786	384	1.570	9,0	18	10,5	1.376
P2/55/1.8	516	283	332	717	1.848	18,0	10	19,5	1.673
P2/55/1.7	424	233	475	588	1.720	12,0	17	15,2	1.508
P2/55/1.5	255	139	780	353	1.527	3,5	23	8,3	1.215
L/55/1.8	536	295	267	743	1.841	24,5	13	24,2	1.709
L/55/1.7	467	257	395	648	1.767	24,5	9	20,6	1.615
L/55/1.5	301	166	621	419	1.507	21,0	15	14,4	1.361
M60	701	420	0	907	2.028	27,0	9	24,4	1.922
P1/60/1.8	549	329	287	709	1.874	27,0	8	16,7	1.713
P1/60/1.7	454	272	457	588	1.771	26,0	12	13,4	1.631
P1/60/1.6	335	201	585	433	1.554	25,0	15	9,2	1.364
P1/60/1.5	264	159	794	342	1.559	19,0	10	7,7	1.293

los hormigones con áridos livianos, ya que además del contenido de aire de la mezcla mide el aire contenido en el árido liviano. Los contenidos de aire se encuentran en un 90 % bajo los 20 lt/m³. Además se aprecia que el contenido de aire está muy relacionado con la trabajabilidad que presenta el hormigón liviano; mezclas más secas presentan mayor volumen de aire debido a que a la muestra se le realiza una compactación estándar, que puede ser insuficiente en algunos casos.

4.2. Densidades del Hormigón Liviano

La Figura 2 presenta una comparación entre la densidad del hormigón liviano en estado fresco y seco al aire, en la que se han separado los hormigones por tipo de árido liviano y se ha incluido una línea de referencia que representa la recta igualdad.

En la figura también se puede observar que a mayor absorción del árido liviano, mayor es la diferencia entre la densidad del hormigón liviano fresca y seca al aire. Los hormigones con Piedra Pómez 2 y los con arcilla expandida presentan la mayor y menor diferencia entre densidades, respectivamente, y corresponden a los áridos de mayor y menor absorción.

Al realizar una regresión entre ambas densidades, considerando la cantidad de cada fase y la absorción del árido liviano, se obtiene la Ecuación 1 y los parámetros estadísticos mostrados:

$$D_f = D_s + 0,766 * \left(\frac{L}{1.000 + \frac{A_{bl}}{100}} * D_{R_{ss.s.l}} \right) * \frac{A_{bl}}{100} + 75,3 * \left(1 - \frac{L}{1.000} \right) \quad (1)$$

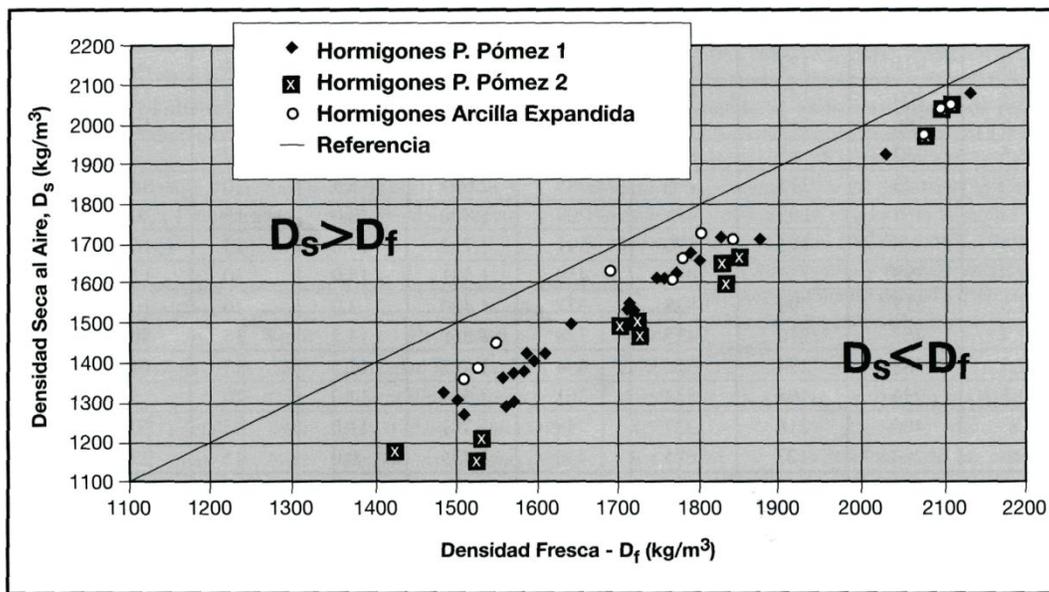


Figura 2. Relación entre densidad seca al aire y densidad fresca del hormigón con áridos livianos.

Como era previsible, tanto la densidad fresca como seca al aire disminuyen al aumentar la fase liviana. Los seis morteros presentan en promedio una densidad fresca y seca al aire de 2.088 kg/m³ y 2.021 kg/m³, respectivamente, mientras que la serie de hormigones más liviana presenta un valor promedio de 1.519 kg/m³ en estado fresco y 1.316 kg/m³, en estado seco al aire.

También se puede observar que la densidad del hormigón liviano en estado fresco es mayor que la densidad en estado seco al aire para todas las mezclas de prueba, dicha diferencia es mayor al aumentar el contenido de árido liviano. Este fenómeno se explica porque la diferencia en peso entre ambos estados está dada por la pérdida de agua que experimenta el hormigón durante el proceso de secado. Mientras mayor es la cantidad de árido liviano, mayor es el agua contenida en sus poros.

Coefficiente de determinación : 0,9694
Límite 95 % confianza : ± 65,0 kg/m³

Asimismo, se puede obtener una relación teórica para la densidad del hormigón liviano en estado fresco en función de la densidad de cada una de las fases componentes. La Ecuación 2 presenta dicha relación y los parámetros estadísticos relevantes. Se ha despreciado la dosis de aire, dado que está incluida implícitamente en la densidad del mortero o fase soportante.

$$D_f = \frac{L}{1.000} * D_{R_{ss.s.l}} + \left(1 - \frac{L}{1.000} \right) * D_m \quad (2)$$

Coefficiente de determinación : 0,9615
Límite 95 % confianza : ± 71,9 kg/m³

en que:

- D_f : Densidad fresca hormigón liviano (kg/m^3)
- D_s : Densidad seca al aire hormigón liviano (kg/m^3)
- L : Volumen absoluto árido liviano (lt/m^3)
- $D_{R_{SSS.1}}$: Densidad real del árido liviano en condición SSS (kg/m^3)
- A_{bl} : Absorción del árido liviano (%)
- D_m : Densidad fresca del mortero o fase soportante (kg/m^3)

Al igualar las ecuaciones 1 y 2, se obtiene una relación entre la densidad del hormigón liviano en estado seco al aire especificada y la dosis de árido liviano en términos de volumen absoluto, en la que interviene la densidad de cada fase y la absorción del árido liviano. Esta relación permite la determinación de la dosis de árido liviano que satisface la condición de densidad especificada.

4.3. Trabajabilidad del Hormigón Liviano

Al analizar la trabajabilidad de las mezclas, se puede observar que en términos generales al aumentar la dosis de agua, la trabajabilidad aumenta. A igual dosis de árido liviano, las series que consideran una fase soportante con mayor cantidad de agua presentan un asentamiento de cono de Abrams mayor que las series con menor cantidad de agua libre. Para un análisis más detallado, se presenta la Figura 3, en la que se muestra la relación entre dosis de agua libre y asentamiento de cono de Abrams, y en la que se han diferenciado las mezclas por densidad.

Al realizar una regresión entre ambas variables se obtiene una relación del tipo exponencial. Su coeficiente de determinación es bajo, debido a que en dicha relación afectan otras variables de importancia como la granulometría del árido combinado y la densidad del hormigón.

Ahora si se analiza la relación entre dosis de agua y trabajabilidad para cada una de las series presentadas, se observa una disminución en la variabilidad. Así, al considerar la serie de morteros, se tiene que demandan mayor cantidad de agua, para una trabajabilidad dada, en comparación con las otras series, lo que se debería a que la granulometría del árido es más fina en este caso. Además, al realizar una regresión entre trabajabilidad y dosis de agua para esta serie, se obtiene un coeficiente de determinación superior a 0,95. De la misma manera, a medida que disminuye la densidad del hormigón (aumenta el contenido de árido grueso liviano), baja la demanda de agua para una trabajabilidad determinada.

Para explicar adecuadamente la relación trabajabilidad dosis de agua se debe considerar la granulometría del árido combinado, representada por su módulo de finura, y la densidad del hormigón en estado fresco.

La Ecuación 3 presenta la regresión obtenida de los datos y los parámetros estadísticos relevantes.

(3)

$$W = 375,6 + 5,0 * e^{0,111 * s} - 91,228 * M_{fc} + 0,0245 * D_f * M_{fc}$$

con:

- Coefficiente de determinación : 0,9305
- Límite 90 % confianza : $\pm 37,1 \text{ kg/m}^3$

donde:

- W : Dosis de agua (kg/m^3)
- M_{fc} : Módulo finura árido combinado
- s : asentamiento cono de Abrams (cm)
- D_f : Densidad fresca hormigón liviano (kg/m^3)

Con el uso de esta relación es posible una primera estimación de la dosis de agua libre que requeriría un

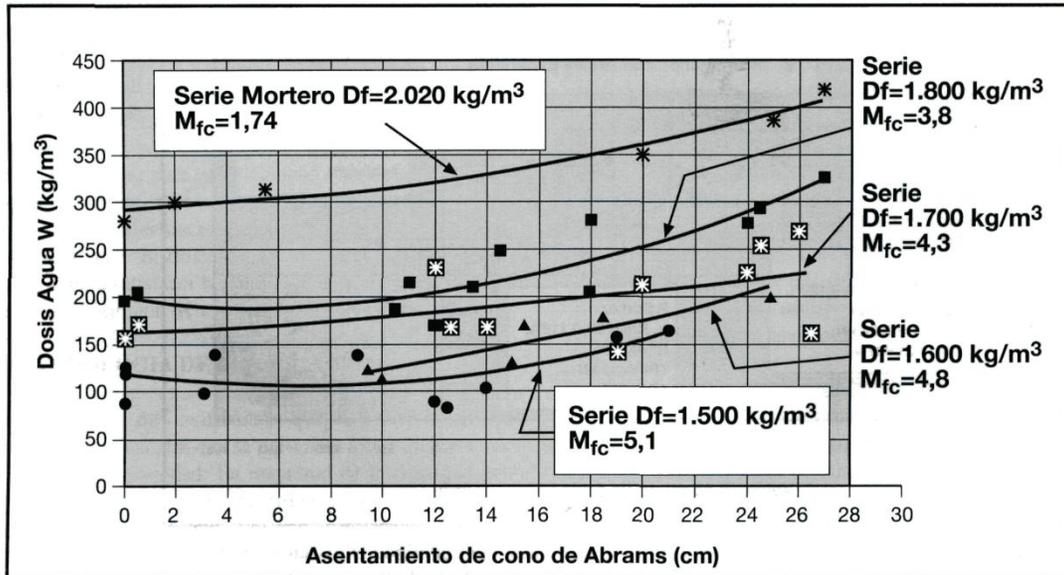


Figura 3. Relación entre trabajabilidad medida con cono de Abrams y dosis de agua para hormigones livianos.

hormigón liviano de cierta densidad en estado fresco, con un árido de módulo de finura dado y una trabajabilidad especificada.

El cálculo del módulo de finura del árido combinado se realiza a partir de la ecuación 4. Dada la gran diferencia de densidad entre ambos áridos, no es posible realizar el cálculo de granulometría en base a los pesos de cada fracción, por lo cual la Fórmula 4 basa su cálculo en el volumen absoluto de cada árido considerado, grueso liviano y fino normal (López, 1999).

$$M_{fc} = \alpha_l * M_{f,l} + (1 - \alpha_l) * M_{f,n} \quad (4)$$

$$\text{donde: } \alpha = \frac{\frac{Al}{(1+A_{bl}) * D_{R_{SS},l}}}{\frac{Al}{(1+A_{bl}) * D_{R_{SS},l}} + \frac{An}{(1+A_{bn}) * D_{R_{SS},n}}}$$

- M_{fc} : Módulo finura árido combinado
- $M_{f,l}$: Módulo finura árido liviano
- $M_{f,n}$: Módulo finura arena normal
- α_l : ponderador $M_{f,l}$, % en volumen absoluto seco de árido liviano
- Al : Peso árido liviano en condición SSS (kg/m^3)
- An : Peso arena normal en condición SSS (kg/m^3)
- A_{bl} : Absorción árido liviano
- A_{bn} : Absorción arena normal
- $D_{R_{SS},l}$: Densidad real árido liviano en condición SSS (kg/m^3)
- $D_{R_{SS},n}$: Densidad real arena normal en condición SSS (kg/m^3)

4.4. Resistencia del Hormigón Liviano

Los resultados indican que la resistencia a compresión cúbica del hormigón disminuye al aumentar la proporción de la fase liviana y disminuir su resistencia intrínseca. El árido liviano tiene una resistencia menor que la fase soportante, por lo que al aumentar la dosis del primero, la resistencia del hormigón, que combina el comportamiento de ambas fases, disminuye.

La Figura 4 muestra la relación entre la resistencia a compresión del hormigón liviano, expresada como porcentaje de la resistencia del mortero o fase soportante y el contenido de árido liviano. Se han diferenciado los hormigones por tipo de árido liviano utilizado en su fabricación y se han efectuado regresiones para cada uno.

La figura muestra claramente una caída en la resistencia a compresión del hormigón liviano 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 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 presenta un valor en su TPFV de 24 kN, coincide con la recta de regresión más inclinada.

A partir de estos resultados se dedujo la Ecuación 5, que permite estimar la resistencia a compresión cúbica del hormigón liviano en función de la resistencia a compresión de la fase soportante y del TPFV y dosis de la fase liviana. Se han incluido además el coeficiente de determinación y los límites para un 95 % de confianza.

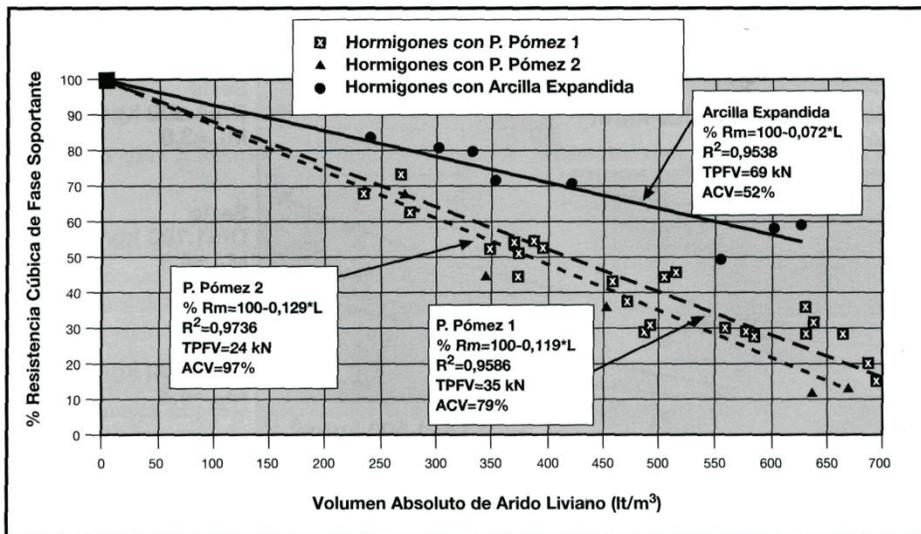


Figura 4. Regresión lineal entre la resistencia a compresión del hormigón expresada como % de la resistencia de la fase soportante, y volumen absoluto de árido liviano en función de sus características resistentes.

$$R_{cu28} = 25,88 - 37,44 * e^{-0,021 * L} - 1,1354 * R_m - 0,4388 * TPFV + 2,7472 * e^{-0,021 * L} * R_m + 0,4307 * e^{-0,021 * L} * TPFV + 0,0214 * R_m * TPFV - 0,0228 * e^{-0,0021 * L} * R_m * TPFV \quad (5)$$

Coefficiente de determinación : 0,9783
 Límite 95 % confianza : $\pm 3,3$ MPa
 donde:

R_{cu28} : Resistencia a compresión cúbica a la edad de 28 días con curado húmedo (MPa)
 R_m : Resistencia a compresión cúbica a la edad de 28 días con curado húmedo del mortero o fase soportante (MPa)
 L : Volumen absoluto árido liviano (lt/m³)
 $TPFV$: Valor del 10 % de finos (kN)

Con esta última relación es posible estimar la resistencia de la fase soportante requerida, para que al combinarse con un contenido dado de árido liviano de resistencia intrínseca determinada, se obtenga la resistencia a compresión especificada en el hormigón.

La última expresión que se requiere para implementar una metodología de dosificación es una que relacione la razón cemento/agua de la fase soportante con su resistencia a compresión. A partir de la fórmula de Bolomey se obtiene la expresión 6 y los parámetros estadísticos mostrados.

$$R_m = 21,5 * \left(\frac{C}{W} - 0,488 \right) \quad (6)$$

Coefficiente de determinación : 0,9814
 Límite 95 % confianza : $\pm 3,57$ MPa
 donde:

R_m : Resistencia a compresión cúbica a la edad de 28 días con curado húmedo del mortero o fase soportante (MPa)
 C/W : Razón cemento/agua, en peso

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

Se tiene entonces que con las Fórmulas 5 y 6 es posible estimar la dosis de cemento requerida en el hormigón para satisfacer la condición de resistencia a compresión del hormigón liviano.

5. METODOLOGIA DE DOSIFICACION

La metodología de dosificación que se propone utiliza cinco hipótesis base, las que se presentan a continuación:

- Hipótesis de densidad: La magnitud de la densidad del hormigón depende de la cantidad y densidad de los materiales constituyentes del hormigón y del contenido de aire atrapado.
- Hipótesis de trabajabilidad: La trabajabilidad del hormigón es función de la dosis de agua, de la granu-

lometría del árido combinado y de la densidad del hormigón en estado fresco.

c) Hipótesis de resistencia: La resistencia a compresión del hormigón depende de la resistencia y cantidad relativa de cada una de sus fases componentes.

d) Hipótesis de resistencia de la fase soportante: La resistencia a compresión de la fase soportante depende fundamentalmente de su razón agua/cemento (W/C).

e) Hipótesis suma de volúmenes absolutos: La suma de los volúmenes absolutos de cemento, agua, árido liviano y normal y contenido de aire debe ser 1 m³.

5.1. Datos de Entrada

La metodología de dosificación se basa en el empleo de relaciones teórico empíricas entre las variables de dosificación (dosis de cemento, agua y áridos) y las variables objetivo (densidad en estado seco, trabajabilidad medida con el método del asentamiento del cono de Abrams y resistencia característica a compresión cúbica del hormigón a la edad de 28 días con curado húmedo).

La metodología de dosificación de las dos fases requiere como datos iniciales las variables objetivo y las propiedades básicas de los áridos a utilizar como: densidad real en condición SSS, absorción, granulometría y el valor del 10 % de finos de árido liviano (TPFV) como índice resistente.

5.2 Procedimiento

La Figura 5 presenta el diagrama de flujo de la metodología de dosificación de las dos fases para hormigones livianos, la que consiste de cinco pasos fundamentales.

a) Paso 1 - Determinación de dosis de árido liviano

La dosis de árido liviano está determinada por los requisitos de densidad especificados para el hormigón liviano. Con la densidad real del árido liviano ($D_{R_{SSS,1}}$), su absorción (A_{b1}), la densidad de la fase soportante supuesta (D_m) y la densidad del hormigón en estado seco al aire (D_s) y el uso de las ecuaciones 1 y 2, se calcula la dosis de árido liviano requerida en términos de volumen absoluto (L). La dosis de árido liviano en kg/m³ de hormigón ($A1$), se obtiene multiplicando el volumen absoluto por la densidad real del árido liviano en condición SSS y dividiendo por 1.000. De los resultados obtenidos en la etapa experimental se recomienda suponer una densidad de partida del mortero de 2.020 kg/m³, que corresponde al promedio de densidad medida en los morteros en estado fresco.

b) Paso 2 - Determinación de dosis de agua

La dosis de agua del hormigón esta determinada por la trabajabilidad especificada para el hormigón como asentamiento del cono de Abrams, las características granulométricas del árido combinado, representadas por su módulo de finura, y por la densidad del hormigón en estado fresco.

Con la dosis de árido liviano determinada en el paso anterior y la ecuación 1 ó 2, se conoce la densidad del

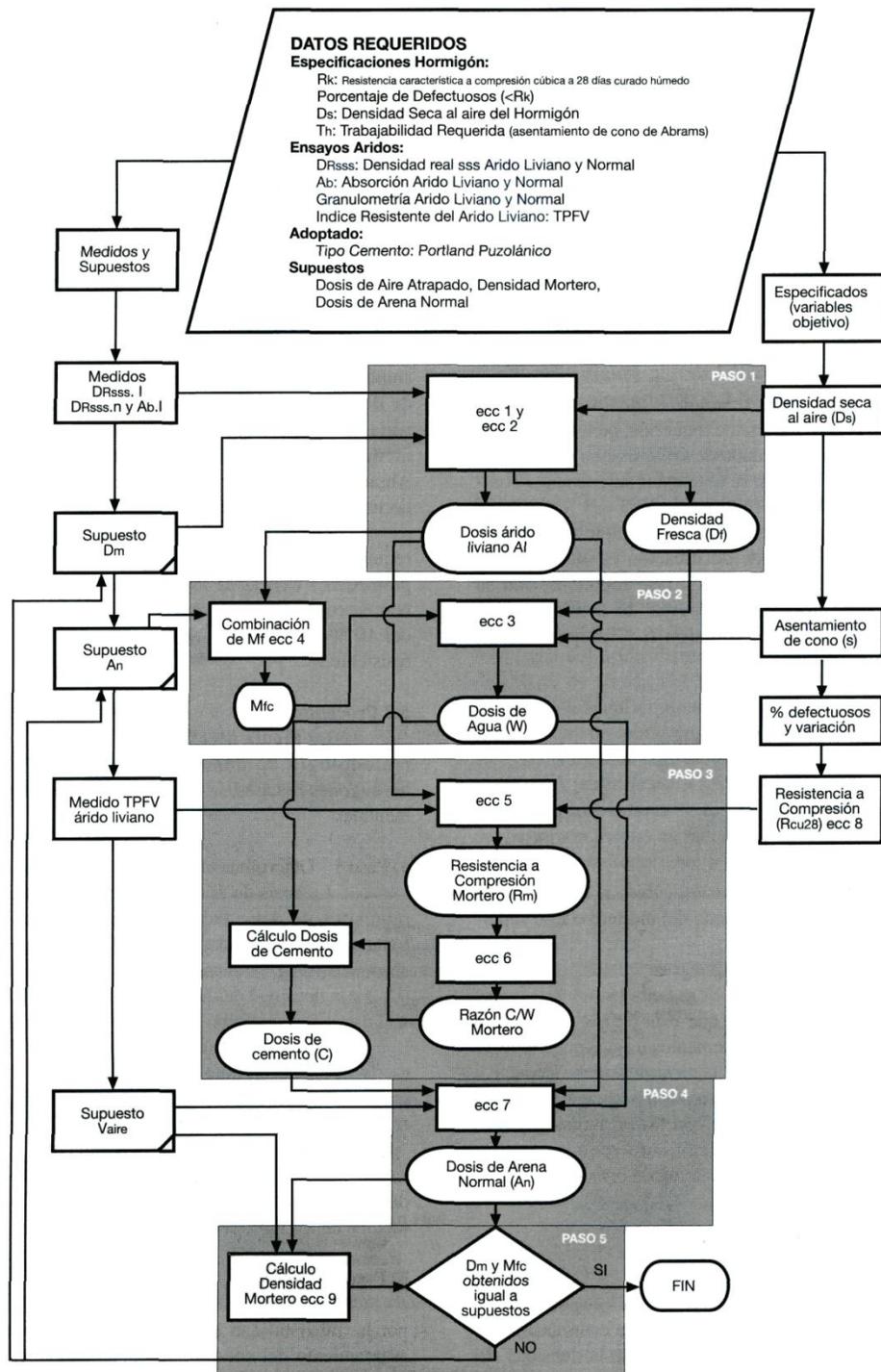


Figura 5. Diagrama de flujo “Metodología de Dosificación de las Dos Fases”.

hormigón en estado fresco. Con el uso de la Fórmula 4 y la suposición de una dosis de arena normal, se conoce el módulo de finura del árido combinado. Finalmente, con la ecuación 3 se estima la dosis de agua (W) requerida en 1 m³ de hormigón para cumplir con la trabajabilidad especificada. Para el supuesto de la dosis de arena (An), se recomienda considerar inicialmente el valor de 550 kg/m³, que es aproximadamente el promedio de los hormigones utilizados en esta investigación.

c) Paso 3 - Determinación de dosis de cemento

La dosis de cemento está determinada por los requisitos de resistencia media a compresión de la fase soportante (Rm), la que a su vez está determinada por la resistencia característica a compresión del hormigón especificada (Rk) y la resistencia propia la fase liviana representada por el valor del 10 % de finos (TPFV).

A partir de la resistencia a compresión característica, la desviación estándar y el porcentaje de defectuosos especificado, se calcula la resistencia media de dosificación a compresión cúbica (R_{cu28}), con la siguiente expresión:

$$R_{cu28} = R_k + t_s * \sigma \quad (7)$$

donde:

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

R_k : Resistencia característica especificada a compresión cúbica a la edad de 28 días con curado húmedo (MPa)

t_s : Coeficiente de Student determinado para la fracción defectuosa especificada (1,282 y 1,036 para un 10 y 15 % de defectuosos)

σ : Desviación estándar de los valores de resistencia (MPa). Se recomienda el valor de 4,0 MPa para hormigones livianos (López, 1999).

Con el valor de R_{cu28}, conocido, el TPFV del árido liviano y la dosis de árido liviano determinada en el Paso 1, es posible estimar la resistencia a compresión requerida de la fase soportante. Con la resistencia a compresión de la fase soportante y la Fórmula 6 se determina la razón cemento/agua (C/W), la que al ser multiplicada por la dosis de agua determinada en el Paso 2, entrega la dosis de cemento requerida en 1 m³ de hormigón (C).

d) Paso 4 - Determinación de dosis de arena

La dosis de arena normal se obtiene a partir de la hipótesis que la suma de los volúmenes absolutos de todos los componentes del hormigón debe ser igual a 1 m³, es decir:

$$\frac{C}{D_{R.c}} + \frac{W}{D_{R.w}} + \frac{Al}{D_{Rsss.l}} + \frac{An}{D_{Rsss.n}} + \frac{V_{aire}}{1.000} = 1 \quad (8)$$

donde:

C : Dosis de cemento (kg/m³)

W : Dosis de agua (kg/m³)

Al : Dosis de árido liviano (kg/m³)

An : Dosis de arena normal (kg/m³)

D_{R.c} : Densidad real del cemento (kg/m³)

D_{R.w} : Densidad real del agua (kg/m³)

D_{Rsss.l} : Densidad real árido liviano en condición SSS (kg/m³)

D_{Rsss.n} : Densidad real arena normal en condición SSS (kg/m³)

V_{aire} : Volumen de aire atrapado (lt/m³).

Conocidas las dosis de árido liviano, agua, cemento y aire atrapado y usando la Fórmula 8, se puede calcular la dosis de arena normal requerida para completar un m³ de hormigón. Considerando que el contenido de aire atrapado en el hormigón no se conoce, debe ser supuesto. Basándose en los resultados obtenidos, se recomienda suponer para dicha variable un valor de 20 lt/m³ (2,0 %), ya que más de un 90 % de los casos está bajo dicho valor.

e) Paso 5 - Verificación Supuestos

En este paso se realiza una verificación de los supuestos efectuados durante los pasos 1 y 2, con respecto a la densidad de la fase soportante y dosis de arena, respectivamente.

La ecuación 9 entrega el valor de la densidad de la fase soportante (D_m), en función de las dosis de cemento (C), agua (W), arena (An) y aire atrapado (V_{aire}), resultado que debe contrastarse con el supuesto adoptado en el Paso 1. Si difieren en más de 2 %, se recomienda comenzar una nueva iteración con el nuevo valor de D_m (límite basado en la recomendación de NCh170 Of.85).

Como se ha dicho, el contenido de aire en el mortero no difiere de manera importante del medido en el hormigón, por lo cual y a modo de aproximación se considera que el mortero contiene todo el aire atrapado.

$$D_m = \frac{C + W + An}{\left(\frac{C}{D_{R.c}} + \frac{W}{D_{R.w}} + \frac{An}{D_{Rsss.n}} + \frac{V_{aire}}{1.000} \right)} \quad (9)$$

donde:

D_m : Densidad fresca del mortero o fase soportante (kg/m³)

C : Dosis de cemento (kg/m³)

W : Dosis de agua (kg/m³)

An : Dosis de arena normal (kg/m³)

D_{R.c} : Densidad real del cemento (kg/m³)

D_{R.w} : Densidad real del agua (kg/m³)

D_{Rsss.n} : Densidad real arena normal en condición SSS (kg/m³)

V_{aire} : Volumen de aire atrapado (lt/m³).

En el Paso 2 se realizó el cálculo del módulo de finura del árido combinado (M_{fc}) en base a una dosis de

arena normal supuesta. Si el valor del módulo de finura calculado con An del Paso 4, difiere en más de un 1 % del utilizado en el Paso 2, con la dosis de arena supuesta, se debe realizar otra iteración con el valor corregido.

Una vez que los valores de D_m y M_{fc} utilizados en los pasos 1 y 2 no difieran de los obtenidos en el paso 5, más allá de los límites propuestos, se tendrá completa la dosificación del hormigón liviano. A partir de esta dosificación se recomienda elaborar un hormigón de prueba en laboratorio con el fin de ajustar la dosificación.

Al realizar una comparación con otras investigaciones previas (Videla y López, 1997 y Pfeiffer, 1968) de manera de validar las ecuaciones propuestas, se obtienen buenos resultados en las estimaciones de resistencia y trabajabilidad.

6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos 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.

En resumen, los hormigones que pueden ser clasificados como hormigones livianos estructurales son P1/35/1.8, P1/40/1.8, P1/45/1.8 y P1/50/1.8 para la Piedra Pómez 1, P2/35/1.8 y P2/55/1.8, para la Piedra Pómez 2 y L/35/1.8, L/35/1.7, L/35/1.5, L/45/1.8, L/45/1.5, L55/1.8 y L/55/1.7 para la arcilla expandida.

Como conclusión general se puede decir que los hormigones livianos estructurales con piedra pómez se plantean como una alternativa técnicamente viable para su utilización en la construcción, dado el valor de la resistencia a compresión *que son capaces de desarrollar* y la ventaja de presentar un peso propio considerablemente menor que un hormigón convencional.

Se puede sostener que a partir de la "Metodología de Dosificación de las Dos Fases" es posible obtener una dosificación para un hormigón con áridos gruesos livianos y fino normal que satisfaga las necesidades del proyecto especificadas, en caso que el árido liviano escogido cumpla con ciertos requisitos de resistencia y densidad. Se trata de un método rápido que estima los valores de densidad, trabajabilidad y resistencia de un hormigón con áridos livianos en función de las propiedades de las fases componentes.

Es importante tener en cuenta el rango de aplicación de la metodología de dosificación. Si esta es aplicada fuera de los rangos definidos en la etapa experimental, las ecuaciones y relaciones propuestas no aseguran una buena estimación de las propiedades del hormigón. Los rangos más importantes para el árido liviano son: TPFV del árido liviano entre 24 y 69 kN y un contenido entre 200 y

700 lt/m^3 . Para la fase soportante una razón W/C entre 0,35 y 0,60.

Se debe decir, además, que la modelación 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 fresco y 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.

Si bien la metodología de las dos fases considera el uso de árido liviano grueso y fino normal, los conceptos considerados en ella son aplicables a hormigones con árido grueso y fino livianos. Para realizar esta aplicación se debe considerar como fase soportante la pasta de cemento y como fase liviana al árido. No obstante, no se asegura una buena estimación de las propiedades, puesto que la base de datos utilizada en la investigación no considera dicho caso.

Cabe mencionar que si bien la metodología de dosificación propuesta no considera el uso de aditivos para el hormigón, no presenta dificultades para considerar su uso. Se debe comenzar con una mezcla de prueba, para determinar el efecto del aditivo en las propiedades del hormigón, por ejemplo ahorro de agua de amasado o aumento de la velocidad de desarrollo de resistencia. Su consideración, para efectos de dosificación, debe realizarse previo a la dosificación de la dosis de arena normal, de manera de calcular está última para completar un m^3 de hormigón.

En resumen, el método de dosificación no se contrapone con la utilización de aditivos y al igual que los métodos del ACI 211.1 (1981) y NCh170 (1985), que tampoco lo consideran en forma específica, se debe ajustar la dosificación según el efecto del aditivo en particular.

7. REFERENCIAS

- CANOVAS, M. (1996), Hormigón. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- HOLM, T. (1995). Lightweight Concrete and Aggregates. American Standard Testing and Materials (ASTM), Standard Technical Publication STP 169C.
- HUMMEL, A., (1966) Prontuario del Hormigón.
- KENNEDY, J., Neville, A. (1974). Basic Statistical Methods For Engineers and Scientists. Thomas Y. Crowell Company, Inc, Nueva York.
- LOPEZ, M. (1999) Proposición de una Metodología de Dosificación de Hormigones Estructurales con Aridos Livianos. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- NEVILLE, A. AND BROOKS, J. (1990), Concrete Technology. Longman Scientific & Technical, Londres.
- NEVILLE, A. (1996), Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc. Nueva York.
- PELLICER, D. (1989), Hormigón Armado en la Construcción Arquitectónica. Editorial Bellisco, Madrid.
- 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.
- SHORT, A. y KINNIBURGH, W. (1967) Concreto Ligero; cálculo, fabricación, diseño y aplicaciones. C. R. Brooks Limited, Londres.
- 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.
- ASTM C173-78 (1978). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method. American Standard Testing and Materials, USA.
- ASTM C330-89 (1989). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. American Standard Testing and Materials, USA.
- ASTM C567-91 (1991). Standard Test Method for Unit Weight of Structural Lightweight Concrete. American Standard Testing and Materials, USA.
- ACI 211.1-81 (1981). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute, USA.
- ACI 211.2-91 (1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. American Concrete Institute, USA.
- ACI 213R-87 (1987). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. American Concrete Institute, USA.
- BS 812: Part 3 (1975). Methods for sampling and testing of mineral aggregates, sand and fillers, Part 3. British Standard, UK.
- NCH 170.Of 85 (1985). Hormigón - Requisitos Generales. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

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.

e-mail: cvidela@ing.puc.cl

Mauricio López C.

Ingeniero Civil, M.Sc.

Profesor, Departamento Ingeniería y Gestión de la Construcción,

Pontificia Universidad Católica de Chile.

e-mail: mlopez@ing.puc.cl

hormigón liviano de cierta densidad en estado fresco, con un árido de módulo de finura dado y una trabajabilidad especificada.

El cálculo del módulo de finura del árido combinado se realiza a partir de la ecuación 4. Dada la gran diferencia de densidad entre ambos áridos, no es posible realizar el cálculo de granulometría en base a los pesos de cada fracción, por lo cual la Fórmula 4 basa su cálculo en el volumen absoluto de cada árido considerado, grueso liviano y fino normal (López, 1999).

$$M_{fc} = \alpha_l * M_{f,l} + (1 - \alpha_l) * M_{f,n} \quad (4)$$

donde: $\alpha = \frac{\frac{Al}{(1+A_{bl}) * D_{R_{SS},l}}}{\frac{Al}{(1+A_{bl}) * D_{R_{SS},l}} + \frac{An}{(1+A_{bn}) * D_{R_{SS},n}}}$

- M_{fc} : Módulo finura árido combinado
- $M_{f,l}$: Módulo finura árido liviano
- $M_{f,n}$: Módulo finura arena normal
- α_l : ponderador $M_{f,l}$, % en volumen absoluto seco de árido liviano
- Al : Peso árido liviano en condición SSS (kg/m³)
- An : Peso arena normal en condición SSS (kg/m³)
- A_{bl} : Absorción árido liviano
- A_{bn} : Absorción arena normal
- $D_{R_{SS},l}$: Densidad real árido liviano en condición SSS (kg/m³)
- $D_{R_{SS},n}$: Densidad real arena normal en condición SSS (kg/m³)

4.4. Resistencia del Hormigón Liviano

Los resultados indican que la resistencia a compresión cúbica del hormigón disminuye al aumentar la proporción de la fase liviana y disminuir su resistencia intrínseca. El árido liviano tiene una resistencia menor que la fase soportante, por lo que al aumentar la dosis del primero, la resistencia del hormigón, que combina el comportamiento de ambas fases, disminuye.

La Figura 4 muestra la relación entre la resistencia a compresión del hormigón liviano, expresada como porcentaje de la resistencia del mortero o fase soportante y el contenido de árido liviano. Se han diferenciado los hormigones por tipo de árido liviano utilizado en su fabricación y se han efectuado regresiones para cada uno.

La figura muestra claramente una caída en la resistencia a compresión del hormigón liviano 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 dosis absoluta de árido liviano de aproximadamente 500 lt/m³, 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 presenta un valor en su TPFV de 24 kN, coincide con la recta de regresión más inclinada.

A partir de estos resultados se dedujo la Ecuación 5, que permite estimar la resistencia a compresión cúbica del hormigón liviano en función de la resistencia a compresión de la fase soportante y del TPFV y dosis de la fase liviana.

Se han incluido además el coeficiente de determinación y los límites para un 95 % de confianza.

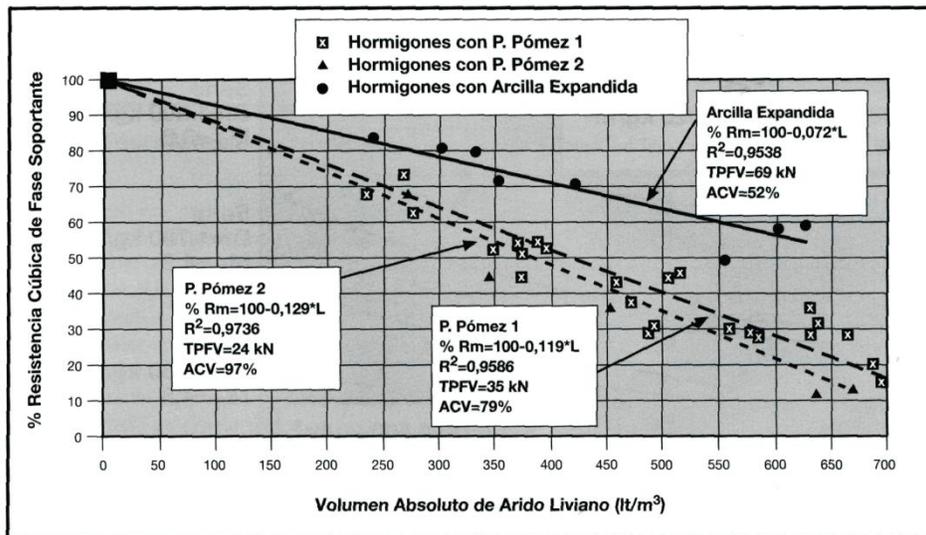


Figura 4. Regresión lineal entre la resistencia a compresión del hormigón expresada como % de la resistencia de la fase soportante, y volumen absoluto de árido liviano en función de sus características resistentes.