

Efecto de la resistencia intrínseca del árido ligero en la resistencia a compresión y rigidez del hormigón ligero

Effect of lightweight aggregate intrinsic strength on lightweight concrete compressive strength and modulus of elasticity

CARLOS VIDELA, MAURICIO LÓPEZ

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Fecha de recepción: 14-XI-2000

CHILE

Fecha de aceptación: 17-I-2001

RESUMEN

El estudio del Hormigón Ligero Estructural (HLE), material compuesto generalmente por cemento, agua y árido ligero, ha estado enfocado principalmente al desarrollo de casos particulares. Por lo anterior, el objetivo principal de esta investigación fue generalizar el conocimiento sobre este material. En particular, la meta de este trabajo fue estudiar el efecto que tiene el reemplazo de árido convencional por un árido ligero, en las propiedades mecánicas del hormigón. El modelo aplicado conceptualiza al HLE como un material de dos fases, una denominada "soportante", constituida por pasta de cemento más arena normal y otra "ligera", formada por árido grueso ligero. 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 ligero y del mortero de cemento. A partir de los resultados se proponen relaciones entre las propiedades mecánicas del HLE (resistencia a compresión y rigidez) y las propiedades y cantidad de los materiales constituyentes. Asimismo, se propone un índice para caracterizar la capacidad estructural del árido ligero, que es de fácil medición y permite estimar las propiedades mecánicas potenciales del hormigón que se podrían obtener con el uso de un árido determinado.

SUMMARY

The study of Structural Lightweight Concrete (SLC), which is a material generally composed of cement, water and lightweight aggregate, has been mainly focused on developing particular cases. Then, the main objective of this research was to generalise the knowledge of this type of material. Particularly, the effect of replacing conventional coarse aggregate by lightweight aggregate on mechanical properties of concrete was studied. SLC may be conceived as a two-phase material. The first phase, composed of cement, water and siliceous natural sand, is called the "resistant phase", and contributes to the structural strength. The second phase is the lightweight phase, comprised of coarse lightweight aggregate, and it is meant to decrease the concrete density. In this way it would be possible to describe the mechanical behaviour of concrete, based on lightweight aggregate and the cement mortar parameters. The obtained results allow for the proposition of relationships between mechanical properties of SLC (such as compressive strength and modulus of elasticity) and the constituent materials properties and amount. At the same time, an easily measured index representing the structural capability of lightweight aggregate is also proposed, this index allows to estimate the potential mechanical properties of concrete which could be obtained by using a particular aggregate.

PALABRAS CLAVE: hormigón ligero, resistencia a compresión, áridos, ligeros, resistencia intrínseca del árido

KEYWORDS: concrete, compressive strength, aggregate, lightweight

1. INTRODUCCIÓN

ACI 213R (1) define al Hormigón Ligero Estructural (HLE) como aquel que posee una densidad en estado seco al aire menor a 1.850 kg/m^3 y posee una

1. INTRODUCTION

According to ACI 213R (1), Structural Lightweight Concrete (SLC) is defined as a concrete with an air dry density smaller than $1,850 \text{ kg/m}^3$, and with

resistencia a compresión cilíndrica superior a 17,2 MPa, lo que significa una resistencia a compresión cúbica superior a 19,0 MPa (2).

Se debe mencionar que las propiedades del hormigón con árido liviano dependen de la cantidad y propiedades del árido particular que se esté utilizando. Este tipo de hormigón incluye al árido ligero como un componente nuevo que tiene un peso específico, resistencia intrínseca y rigidez menor que los áridos normales. Estas características del árido ligero disminuyen la magnitud de la resistencia y rigidez del hormigón (3). Basado en esto, Holm (4) plantea la existencia de una "resistencia límite", propia de cada árido, desde la cual un aumento en la cantidad de cemento no implica un aumento significativo de resistencia. Como consecuencia de esto, las relaciones tradicionales entre resistencia del hormigón y relación agua/cemento (W/C) pierden validez para el hormigón ligero, ya que no consideran las particularidades del árido utilizado. Debido a lo anterior, es de gran importancia estudiar y cuantificar, entre otras cosas, el efecto del uso de áridos ligeros en la resistencia y rigidez del hormigón.

Esto posibilitaría dos importantes aspectos: la dosificación del HLE en base a las características de los áridos ligeros disponibles en cada localidad (5) y la predicción de sus propiedades mediante métodos teórico-empíricos.

El hormigón con árido grueso ligero y arena de densidad normal puede ser conceptualizado como un material de dos fases, una fase soportante, constituida por mortero de peso normal (cemento, agua y arena normal) y otra fase ligera, formada por el árido de baja densidad. La resistencia mecánica y rigidez del HLE dependerán entonces de la resistencia, rigidez y proporción de cada una de las fases constituyentes. El concepto de las dos fases puede ser aplicado debido a que la zona de transición no sería un factor limitante de la resistencia en este caso.

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

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se diseñó y ejecutó un programa experimental basado en el concepto de las dos fases. Para ello se consideró seis tipos de fase soportante (con diferente relación W/C). Además se utilizó tres tipos de fase ligera: dos de origen natural (piedra Pómez 1 y 2), y una de origen artificial conocida como Arcilla Expandida o Leca.

compressive strength of cylinders higher than 17.2 MPa, it means a cubic compressive strength higher than 19.0 MPa (2).

It should be noted that the properties of the lightweight aggregate concrete depend on the amount and the properties of the particular lightweight aggregate that is being used. This kind of concrete includes the lightweight aggregate as a new component, which has a specific weight, intrinsic strength and rigidity smaller than normal aggregates. The lightweight aggregate characteristics reduce the value of compressive strength and modulus of elasticity of concrete (3). Thus, Holm (4), postulate the existence of a "ceiling strength" which is different for each lightweight aggregate source, where further additions of cementitious material will not significantly raise the maximum attainable strength. As a consequence of the previously exposed idea, the traditional relationship between concrete strength and water-cement ratio (W/C) is not valid for SLC since they do not incorporate the mechanical properties of the aggregate. Due to the above mentioned, the study and the quantification of the lightweight aggregate effect on concrete strength and rigidity is very important.

This would make possible two important issues: the SLC mix design based on the properties of the locally available lightweight aggregate (5) and the SLC properties prediction based on theoretical and empirical methods.

The sand lightweight concrete (concrete with natural sand and lightweight coarse aggregate) may be conceived as a two-phase material: a resistant phase comprised of normal mortar (cement, water and natural sand) and a lightweight phase defined by the lightweight coarse aggregate. The SLC strength and modulus of elasticity will depend on the strength, modulus of elasticity and proportion of each phase. The two-phase concept could be applied because the transition zone would not be a strength-limiting factor in this case.

The aim of this research is to develop expressions allowing to describe the effect of the properties and amount of each component phase on concrete mechanical properties.

2. EXPERIMENTAL PROGRAM

An extensive experimental program based on the two-phase concept was designed and carried out. Six types of resistant phase with different W/C ratio were considered. Also, three types of lightweight phase were utilised: two natural aggregates (Pumice 1 and 2), and one artificial aggregate known as Expanded Clay or Leca.

2.1 Materiales

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 de la mezcla de cemento obtenida. 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 (6) denominados valor de trituración del árido (ACV) y valor del 10% de finos (TPFV). El ACV entrega una medida relativa de la resistencia a la trituración de un árido sometido a una carga de compresión creciente durante un período de 10 minutos. El TPFV representa la magnitud de la carga requerida que produce una trituración equivalente a un 10% del peso de la muestra de árido.

2.1 Materials

A mix of equal proportions of two brands of Portland Pozzolana cement was used in the trial mixes. Table 1 shows the properties of the cement mix employed. Standard tests were performed in order to characterise the aggregates. The properties of the used aggregates are shown in Table 2. The standard tests included unit weight, specific gravity, absorption and grading (represented by the fineness modulus) and two special tests of intrinsic strength from BS 812 (6), denominated as aggregate crushing value (ACV) and 10% fines value (TPFV). The ACV test method gives a relative measure of the resistance of an aggregate to crushing under a gradually increasing compressive load applied over a period of 10 minutes. The TPFV represents the magnitude of the required load to produce a crushing equivalent to 10% of the weight of the aggregate sample.

TABLA 1/TABLE 1

Propiedades del cemento
(Cement properties)

Propiedad - Property	Valor Value	
Densidad Real - Specific Gravity (kg/m^3)	2922	
Finura Blaine - Blaine Fineness (cm^2/g)	4365	
Resistencia Flexotracción ¹ <i>Flexural Strength¹ (MPa)</i>	7 días <i>days</i>	4.5
	28 días <i>days</i>	6.3
Resistencia Compresión ¹ <i>Compressive Strength (MPa)¹</i>	7 días <i>days</i>	23.9
	28 días <i>days</i>	33.2
Agua de Consistencia Normal <i>Standard Consistency Water (cm^3)</i>	32.0	
Tiempo fraguado inicial/ <i>Initial set (Vicat h)</i>	4:00	
Tiempo fraguado final/ <i>Final set (Vicat h)</i>	6:00	
Contenido Puzolana/Pozzolana Content (%)	28.9	
Contenido Yeso/Gypsum Content (%)	5.3	

¹Resistencia Flexotracción y Compresión probetas Rilem
- Flexural and Compressive Strength in Rilem Specimens

^{2,3} D_{RSS}/D_{Rseca} : Densidad Real en condición SSS/Seca
- Specific Gravity in SSD/Dry condition

⁴ D_{aca} : Densidad Aparente Compactada Seca - Dry Unit Weight

TABLA 2/TABLE 2

Propiedades de los áridos
(Aggregates properties)

	Pómez 1 <i>Pumice 1</i>	Pómez 2 <i>Pumice 2</i>
D_{RSS} (kg/m^3) ²	1245	1228
D_{Rseca} (kg/m^3) ³	887	573
D_{aca} (kg/m^3) ⁴	564	314
Absorción / <i>Absorption (%)</i>	40.0	85.0
Módulo de Finura <i>Fineness Modulus -M_f</i>	5.96	5.42
TPFV(kN)	35	24
ACV (%)	79	97
	Leca	Arena Normal Natural Sand
D_{RSS} (kg/m^3) ²	1120	2556
D_{Rseca} (kg/m^3) ³	982	2483
D_{aca} (kg/m^3) ⁴	640	1549
Absorción/ <i>Absorption (%)</i>	17.0	2.9
Módulo de Finura <i>Fineness Modulus -M_f</i>	5.96	1.74
TPFV(kN)	69	-
ACV (%)	52	-

2.2 Dosificaciones, ensayos y presentación de resultados

Las dosificaciones de las mezclas fueron efectuadas a partir del reemplazo parcial de la fase soportante por la fase ligera, con objeto de analizar su efecto en las propiedades del hormigón. La nomenclatura consiste en una letra "M" de mortero y en caso de ser hormigón la sigla "P1", "P2" o "L", que corresponde a la identificación del árido ligero, 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 ligero.

La proporción de cada amasada de hormigón 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 (7), medición de la densidad en estado fresco (8), y medición del contenido de aire con el método volumétrico (9).

En estado endurecido se realizó ensayos de resistencia a compresión (10) y módulo de elasticidad (11) en probetas cilíndricas, a 7 y 28 días de edad, y ensayos a compresión en probetas cúbicas a 3, 7 y 28 días (12). Todas las probetas fueron sometidas a curado normalizado (20 ± 3 °C y HR > 90%). Finalmente, a probetas en estado seco al aire se les realizó la medición de la densidad (13), resistencia a compresión (10) y módulo de elasticidad (11).

2.2 Mix proportions, tests and presentation of test results

Each concrete mix was designed by substituting a proportion of the resistant phase by lightweight phase, in such a way as to allow for the analysis of the effect of the replacement material on the concrete properties. The nomenclature consists of a letter "M" for mortar and in the case of lightweight concrete the abbreviation "P1", "P2" or "L", to indicate Pumice 1, Pumice 2 and Leca, respectively. Then a number that symbolises the cubic compressive strength of the resistant phase in MPa (49, 45, 38, 32, 29, 24). Finally there is a number that represents the percentual content of the lightweight aggregate by volume.

The mix proportion of each batch of concrete is shown in Table 3.

Several standard tests were carried out on every fresh concrete mix, among which include the slump (7), freshly mixed density (8) and air content test by the volumetric method (9).

In hardened condition, compressive strength [10] and modulus of elasticity (11) tests were performed on cylindrical specimens at 7 and 28 days. Also, cubic compressive strength tests (12) at 3, 7 and 28 days were also carried out. Each specimen was conserved at standard moisture condition (20 ± 3 °C and HR > 90%). Finally, density (13), compressive strength (10) and modulus of elasticity (11) tests were carried out to each specimen in air-dry condition.

TABLA 3/TABLE 3
Proporción de las mezclas de hormigón, kg/m³
(Concrete mix proportions, kg/m³)

Tipo Type	C	W	Al	An	Tipo Type	C	W	Al	An	Tipo Type	C	W	Al	An
M49	853	299	0	952	M38	696	313	0	1085	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	1147	M32	704	352	0	1040	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

C: Cemento/Cement, W. Agua/Water, Al: Árido grueso ligero/Lightweight coarse aggregate, An: Arena normal/Natural sand

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de los ensayos realizados a cada mezcla de hormigón se presentan en la Tabla 4, agrupados según las características de la fase resistente. Así, el hormigón que inicia cada serie representa un mortero normal con un 100% de fase soportante y 0% de fase ligera; las siguientes mezclas muestran paulatinamente un aumento de la fase ligera con relación a la soportante

3.1 Resistencia a compresión del hormigón

La Tabla 4 muestra la relación entre la resistencia cúbica a compresión del hormigón y el contenido de árido ligero. Se han diferenciado los hormigones por el tipo de fase resistente y el tipo de árido ligero utilizado en su fabricación, como modo de apreciar el efecto de la resistencia de la fase ligera en la resistencia a compresión del hormigón.

Como se puede apreciar, a mayor contenido de fase liviana en el hormigón menor es la resistencia a compresión. Dicha disminución no es constante y depende principalmente de la resistencia de cada fase. Si se hace una distinción entre tipo de fase ligera utilizada, se puede comprobar que las mezclas con arcilla expandida experimentan una menor caída en la resistencia que el resto.

3. ANALYSIS OF TEST RESULTS

The test results for each concrete mix are presented in Table 4 grouped by resistant phase characteristics. Thus, the concrete starting each series represents a normal mortar with 100% of resistant phase and 0% of lightweight phase; the following mixes show a gradual increase of the lightweight phase in relation to the resistant phase.

3.1 Concrete compressive strength

Table 4 shows the relationship between concrete cubic compressive strength and lightweight aggregate content. The results have been differentiated, according to the type of resistant phase and then, according to the type of lightweight phase. This way it is possible to highlight the effect of the lightweight phase compressive strength on concrete compressive strength.

It can be observed that the larger the lightweight phase content, the lower the compressive strength. The magnitude of this effect is not always the same and mainly depends on the strength of each phase. If we make a distinction between each lightweight phase, it may be concluded that mixes with expanded clay show a lower strength decrease than the others.

TABLA 4/TABLE 4

Resultados de ensayos en mezclas de hormigón

(Test results of concrete mixes)

Tipo Type	D	R _{cu3}	R _{cu7}	R _{cu28}	E ₇	E ₂₈	Tipo Type	D	R _{cu3}	R _{cu7}	R _{cu28}	E ₇	E ₂₈	Tipo Type	D	R _{cu3}	R _{cu7}	R _{cu28}	E ₇	E ₂₈
	kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		MPa	kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa
N49	2110	30.4	36.7	49.1	14000	17675	M38	2093	19.1	27.3	38.2	12950	16975	M29	2063	13.7	19.9	28.7	11200	14700
P1/49/30	1810	13.3	19.1	25.6	5600	11375	P1/38/30	1767	10.8	15.1	20.1	8400	10325	P1/29/30	1803	9.7	13.6	18.2	8400	10500
P1/49/43	1693	5.9	10.3	15.5	6650	9975	P1/38/43	1697	9.2	13.1	16.8	6300	8575	P1/29/43	1693	7.4	10.8	15.5	7350	8925
P1/49/55	1573	7.9	10.6	14.7	3150	8750	P1/38/55	1543	4.8	7.2	11.7	4900	6825	P1/29/55	1537	6.5	9.2	13.6	6300	7525
P1/49/66	1533	3.1	6.1	10.2	4200	6300	P1/38/66	1550	4.1	6.8	10.6	4550	5950	P1/29/66	1533	4.7	6.5	10.5	5250	7000
P2/49/30	1797	16.1	17.8	25.8	10500	12600	P2/38/30	1770	8.6	12.5	17.2	4550	9800	P2/29/30	1817	9.0	14.1	19.5	8050	11375
P2/49/43	1673	12.2	13.8	18.6	5950	10675	P2/38/43	1683	6.5	9.4	14.1	5250	7525	P2/29/43	1707	7.6	10.4	15.2	6300	8575
P2/49/66	1360	4.1	4.6	6.1	4200	4550	P2/38/66	1487	1.8	3.2	5.5	2450	3675	P2/29/66	1513	3.4	5.8	8.3	3850	4900
L/49/30	1777	27.3	34.1	39.1	12600	14525	L/38/30	1727	17.7	23.7	30.9	10500	12250	L/29/30	1837	11.6	16.6	24.2	5950	11200
L/49/43	1687	26.0	30.9	34.9	11900	12950								L/29/43	1720	13.3	14.3	20.6	8050	9800
L/49/66	1510	21.2	23.6	28.8	9450	11025	L/38/66	1463	10.5	15.2	22.1	7700	9275	L/29/66	1500	5.1	9.0	14.4	6300	7525
M45	2127	22.0	32.6	45.2	13300	16275	M32	2077	15.8	23.3	32.5	11900	16100	M24	1980	10.2	15.7	24.4	9100	13475
P1/45/30	1770	11.7	15.1	20.2	8050	9975	P1/32/30	1803	12.8	17.4	23.9	8750	11200	P1/24/30	1843	8.2	11.3	16.7	7350	10675
P1/45/43	1653	7.2	9.2	13.7	6300	8400	P1/32/43	1707	10.2	13.6	17.8	7350	8750	P1/24/43	1680	5.1	8.4	13.4	7700	8925
P1/45/55	1557	5.6	8.7	12.9	5600	7525	P1/32/55	1620	7.1	10.9	14.6	5950	7700	P1/24/55	1453	3.3	5.3	9.2	3500	5775
P1/45/66	1457	2.1	4.1	7.1	3500	4900	P1/32/66	1513	3.5	5.8	9.5	4200	5950	P1/24/66	1477	2.5	4.2	7.7	3850	5075

D: Densidad/Density, R_{cut}: Resistencia cúbica a t días/Cubic compressive strength at t days, E_t: Módulo de elasticidad a t días/Modulus of elasticity at t days

La Figura 1 muestra la relación entre la resistencia a compresión del hormigón a cualquier edad, expresada como porcentaje de la resistencia de la fase soportante, y el contenido de árido ligero. Se han diferenciado los hormigones por tipo de árido ligero y se han efectuado regresiones para cada uno.

La figura muestra claramente una caída de la resistencia a compresión del hormigón 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 l/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.

Ahora bien, a medida que la resistencia intrínseca del árido ligero disminuye (representada por TPFV), menor es la resistencia del hormigón a igual contenido de árido ligero. El árido ligero más débil (Pómez 2: TPFV=24 kN), tiene la recta de regresión más inclinada.

A partir de los análisis efectuados a los 94 resultados se deduce la Ecuación 1, expresión que permite estimar la resistencia a compresión del hormigón, en condición húmeda, en función de la cantidad y características resistentes de las fases soportante y ligera. El análisis estadístico indicó que las variables relevantes en la magnitud de la resistencia a compresión del hormigón (R_{cu}), son las siguientes: resistencia de la fase soportante (R_{mt}), volumen absoluto de árido ligero (L) y valor del 10% de finos (TPFV) como índice resistente del árido ligero.

$$R_{cut} = [1 - (1,7526 - 0,01584 \cdot TPFV) \cdot L] \cdot R_{mt} \quad (1)$$

Coefficiente de determinación/n: 0,9571/94
 Error estándar de la estimación: 2,01 MPa
 Límite 95% confianza: $\pm 4,0$ MPa
 R_{cut} : Resistencia a compresión cúbica del hormigón a cualquier edad (MPa)
 R_{mt} : Resistencia a compresión cúbica de la fase soportante a cualquier edad (MPa)
 L : Volumen absoluto árido ligero (m³/m³)
 TPFV: Valor del 10% de finos (kN)

Los 2 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 (ANOVA) se concluye que el modelo resulta ser estadísticamente significativo con un 99% de confiabilidad. Asimismo, se puede sostener que el modelo explica

Figure 1 shows the relationship between concrete compressive strength at any age (expressed as a percentage of resistant phase strength) and lightweight aggregate content. The concretes have been differentiated according to the type of lightweight phase and regression analysis were carried out for each type.

The figure clearly shows a compressive strength decrease of the concrete strength when the lightweight aggregate content increases. It should be pointed out that the three proposed regressions explain more than 95% of concrete strength variability. For example, for a lightweight aggregate content of approximately 500 l/m³ the concrete measured strengths are 64.0; 40.5 and 35.5% of the resistant phase strength, for concrete with Expanded Clay, Pumice 1 and Pumice 2, respectively.

On the other hand, as the aggregate intrinsic strength (represented by TPFV) decreases, the concrete strength, for an equal lightweight aggregate content, decreases. The weakest lightweight aggregate (Pumice 2: TPFV=24 kN) has the regression line with the most marked slope.

Equation 1 was derived from the analysis of 94 results, this equation allows an estimate of the concrete compressive strength, as a function of the quantity and strength characteristics of both, resistant phase and lightweight phase. The statistics analysis showed that the main variables affecting the concrete compressive strength (R_{cu}) are the following: resistant phase compressive strength (R_{mt}), lightweight aggregate absolute volume (L), and 10% fines value (TPFV) as a resistant index of the lightweight aggregate.

Coefficient of determination/n: 0.9571/94
 Standard error of estimation: 2.01 MPa
 95% Confidence level: ± 4.0 MPa
 R_{cut} : Concrete compressive strength of cubes at any age (MPa)
 R_{mt} : Resistant phase compressive strength of cubes at any age (MPa)
 L : Lightweight aggregate absolute volume (m³/m³)
 TPFV: 10% fines value (kN)

The 2 estimated parameters of the equation have a P-Value equal or smaller than 0.01, it means that all of them are significant in the regression with 99% of confidence. The Analysis of Variance (ANOVA) shows that the model is statistically significant with a confidence level of 99%. Also, it can be stated that the model explains 95.7% of the variability of R_{cut} . The

en un 95,7% la variabilidad de R_{cut} . El intervalo para un 95% de confianza es $\pm 4,0$ MPa. La Ecuación 1 da una muy buena estimación para R_{cut} . El error máximo de la estimación es 5,4 MPa para el hormigón L/49/30 y el error mínimo es nulo para el hormigón P2/49/66 y para todos los morteros.

Con el fin de analizar la sensibilidad del modelo, la Figura 2 muestra el efecto de la magnitud de la resistencia intrínseca de la fase ligera (expresada como TPFV), en la resistencia a compresión del hormigón. Con el fin de establecer comparaciones se adoptó una resistencia a compresión de la fase soportante de 50 MPa y 5 diferentes volúmenes de árido ligero por m^3 de hormigón: 200, 300, 400, 500 y 600 l/m^3 .

Como se aprecia en la Figura 2, el valor del 10% de finos es un parámetro altamente significativo en la resistencia a compresión del hormigón. Así, para un contenido de árido ligero de 200 l/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 l/m^3 . Esta pérdida de resistencia es más pronunciada para hormigones con fase ligera más débil (menor TPFV).

Con el fin de establecer límites en cuanto a capacidad resistente y dosis del árido ligero para obtener HLE, se puede utilizar la Figura 2. En un análisis correspondiente a TPFV de 70 kN, que representa a los hormigones con arcilla expandida (TPFV=69 kN), se tiene que con la fase soportante considerada (50 MPa), siempre se obtiene HLE (es decir, hormigón con una resistencia a compresión cúbica superior a 19,0 MPa).

Por otra parte, para áridos ligeros más débiles se encuentra un límite máximo en la dosis de árido ligero

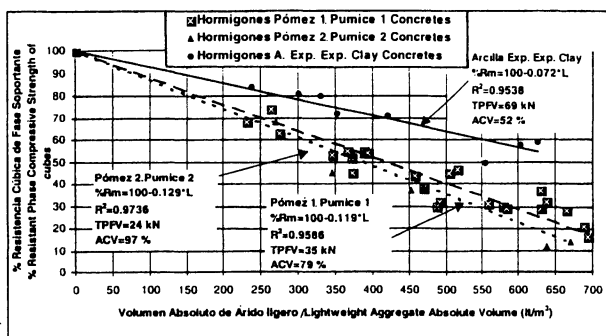


Figura 1.- Relación entre resistencia a compresión cúbica del hormigón y volumen absoluto de árido ligero.

Figure 1.- Relationship between concrete compressive strength of cubes and lightweight aggregate absolute volume.

95% confidence interval is ± 4.0 MPa. Equation 1 gives a good estimate for R_{cut} value. The maximum estimate error is 5.4 MPa for L/49/30 concrete and the minimum error is non-existent for P2/49/66 and all mortar mixes.

In order to analyse the model sensitivity, Figure 2 shows the effect of the lightweight phase intrinsic strength (expressed as TPFV), on concrete compressive strength. With the purpose of establishing a comparison, a value for the resistant phase compressive strength of 50 MPa was adopted, and 5 lightweight aggregate dosage were considered: 200, 300, 400, 500 and 600 l/m^3 .

As we can observe in Figure 2, TPFV is a significant factor in the concrete compressive strength. Then, for a lightweight aggregate content of 200 l/m^3 , the compressive strength could decrease between 4 and 20% when the TPFV changes between 70 and 25 kN, respectively. For higher lightweight phase contents, the mentioned effect of the aggregate intrinsic strength is even larger. For a lightweight aggregate content of 600 l/m^3 the concrete compressive strength decreases between 40 and 60%. Then, the weaker the lightweight phase, the larger the concrete compressive strength loss.

In order to establish a limit in the content or in the lightweight aggregate strength to obtain a SLC, we can utilise Figure 2. An analysis for the 70 kN curve, which represents concrete with Expanded Clay (TPFV=69 kN), demonstrates that a SLC could always be obtained with the considered resistant phase of 50 MPa (i.e. concrete with a compressive strength of cubes larger than 19.0 MPa).

On the other hand, for weaker lightweight aggregates there is a maximum content of lightweight aggregate

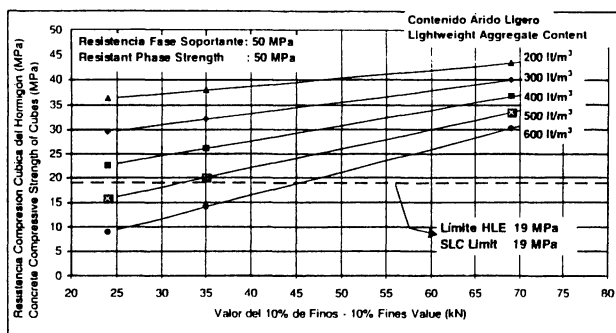


Figura 2.- Relación entre resistencia a compresión cúbica y TPFV del árido para 5 contenidos de árido ligero.

Figure 2.- Relationship between compressive strength of cubes and aggregate TPFV for 5 lightweight aggregate content.

que es posible utilizar para cumplir con el límite de resistencia mínima propuesto por ACI [1]. Por ejemplo, para áridos con TPFV de 40 y 25 kN, las dosis máximas recomendadas serían aproximadamente de 500 y 400 l/m³, respectivamente. Con contenidos superiores se estaría obteniendo una resistencia a compresión fuera del rango estructural (ver Figura 2).

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, es posible estimar la densidad mínima del HLE que es posible obtener con un árido en particular, conocidos su TPFV, densidad real en condición SSS y su dosis máxima. Ésta es una información muy importante cuando se desea usar un nuevo árido ligero en un proyecto.

La Ecuación 1 describe, además, la influencia de la resistencia de la fase soportante en la resistencia del hormigón. Así, por ejemplo, si se especifica una resistencia a compresión cúbica de 30 MPa y se considera adicionar 200 l/m³ de árido ligero, se requeriría una resistencia de la fase soportante de 34 MPa para un árido con TPFV de 70 kN. Si la dosis de fase ligera aumenta a 600 l/m³, se requeriría una fase soportante capaz de resistir más de 50 MPa. Para un árido ligero más débil (TPFV 40 kN) y una dosis de 600 l/m³, no sería técnica ni económicamente factible producir un hormigón ligero con la resistencia de 30 MPa, ya que la fase soportante debería resistir aproximadamente 115 MPa.

Finalmente, sería posible estimar la resistencia a compresión de un hormigón ligero conocida su dosificación, si se cuenta con una expresión que relacione la razón agua/cemento de la fase soportante con su resistencia a compresión para una edad dada, tal como la ecuación de Abrams (14). Para el cemento particular usado en esta investigación se dedujo la expresión 2 y se indican los parámetros estadísticos obtenidos.

Se debe hacer notar que la Ecuación 2 es propia o característica del cemento usado en esta investigación, por lo que debería deducirse o adoptarse valores recomendados en normas para otros cementos y edades. Con las expresiones 1 y 2 es posible estimar la resistencia cúbica a compresión del hormigón ligero a partir de la dosis de cemento, agua y árido ligero utilizadas y las características físicas y mecánicas de este último.

Con el objeto de validar las ecuaciones propuestas se realizó una comparación con investigaciones previas (15) y (16). Las estimaciones de resistencia a compresión resultaron ser satisfactorias quedando dentro de los límites del 95% de confiabilidad.

in order to meet the minimum strength limit proposed by ACI (1). For example, aggregates with a TPFV of 40 and 25 kN, allow a maximum content of lightweight aggregate of approximately 500 and 400 l/m³, respectively. For higher contents of lightweight aggregate, the concrete compressive strength does not fulfil the structural requirements (see Figure 2).

As a consequence of the previously exposed issue, it is possible to estimate the minimum density of concrete that could be obtained with a given aggregate when its TPFV, specific gravity SSD and maximum content are known. When a new lightweight aggregate wants to be used in a project, the lower attainable density is a very important value to be taken into account.

Equation 1 also describes the influence of the resistant phase compressive strength, in the compressive strength of concrete. For example, when a concrete compressive strength cubes of 30 MPa is specified, and 200 l/m³ of lightweight aggregate are considered to be added to the concrete. Then a resistant phase strength of 34 MPa would be required for an aggregate with a TPFV of 70 kN, in order to meet the specific strength. If the lightweight phase content increased to 600 l/m³ it would be required a resistant phase with a compressive strength larger than 50 MPa. For a weaker aggregate (TPFV 40 kN) and a lightweight aggregate content of 600 l/m³, it would not be technically nor economically feasible to produce 30 MPa strength lightweight concrete, because the resistant phase should resist approximately 115 MPa.

Finally, it would be possible to estimate the lightweight concrete compressive strength if the mix design and an expression relating the resistant phase W/C ratio to compressive strength for a given age such as the Abrams' equation (14) are known. Equation 2 was adjusted to the particular cement used in this research and the obtained statistical parameters are shown.

It should be noted that Equation 2 depends on the properties of the current cement used. Hence, values for other cements or ages should be derived or obtained from previous experiences and standards. With Equations 1 and 2 it is possible to estimate the lightweight concrete compressive strength of cubes based on the content of cement, water and lightweight aggregate, and the physical and mechanical characteristics of the lightweight aggregate.

To validate the proposal equations, a comparison with previous researches (15) and (16) was carried out. The concrete compressive strength estimates were satisfactory within the 95% confidence interval.

$$R_{m28} = \frac{135}{2,63^{(w/c)}} \quad (2)$$

Coeficiente de determinación: 0,991
 Error estándar de la estimación: 1,02 MPa
 Límite 95% confianza: ± 2,50 MPa
 R_{m28} : Resistencia a compresión cúbica de la fase soportante a la edad de 28 días (MPa)
 w/c: Razón agua/cemento en volumen

Coefficient of determination: 0.991
Standard error of estimation: 1.02 MPa
95% Confidence level: ± 2.50 MPa
 R_{m28} : *Resistant phase compressive strength of cubes at 28 days (MPa)*
 w/c: *cement /water ratio by volume*

3.2 Módulo de elasticidad del hormigón

El análisis de la rigidez del hormigón ligero se realizó siguiendo el mismo procedimiento utilizado en la sección 3.1, es decir, se buscó determinar la influencia de la resistencia, rigidez y proporción de cada fase en el módulo de elasticidad del hormigón ligero.

3.2 Concrete modulus of elasticity

The analysis of the modulus of elasticity of lightweight concrete was carried out following the same procedure used in section 3.1. In other words the objective was to determine the influence of strength, modulus of elasticity and proportion of each phase on concrete modulus of elasticity.

En la Tabla 4 se puede ver la relación entre el módulo de elasticidad del hormigón y el contenido de árido ligero. Los resultados se han separado, primero por tipo de fase soportante y luego por tipo de fase liviana.

In Table 4 the relationship between concrete modulus of elasticity and lightweight aggregate content can be seen. The results have been differentiated, first according to the type of resistant phase and then, according to the type of lightweight phase.

Como se aprecia en la Tabla 4, la rigidez del hormigón disminuye al aumentar el contenido de fase liviana. Este comportamiento 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.

From Table 4 it can be observed that the concrete rigidity decreases when the lightweight phase content increases. This behaviour happens because the modulus of elasticity of the lightweight phase is smaller than the resistant phase modulus of elasticity.

Se aprecia además que, a igual contenido de árido ligero, a mayor resistencia intrínseca del árido, mayor es el módulo de elasticidad. Asimismo, se puede ver que a igual tipo y contenido de fase liviana, a mayor módulo de elasticidad de la fase soportante, mayor es el módulo de elasticidad del hormigón.

Then, an increase of the lightweight phase content produces a fall of the concrete rigidity. We can also observe that for the same lightweight aggregate content, the larger the aggregate intrinsic strength, the higher the concrete modulus of elasticity. Likewise, for the same lightweight phase type and content, the more rigid the resistance phase, the higher the concrete modulus of elasticity.

En la Figura 3 se analiza el efecto de la dosis de fase liviana en el módulo de elasticidad del hormigón (este último expresado como porcentaje del módulo de

Figure 3 shows the effect of the lightweight phase content on concrete modulus of elasticity (expressed as a percentage of resistant phase modulus of

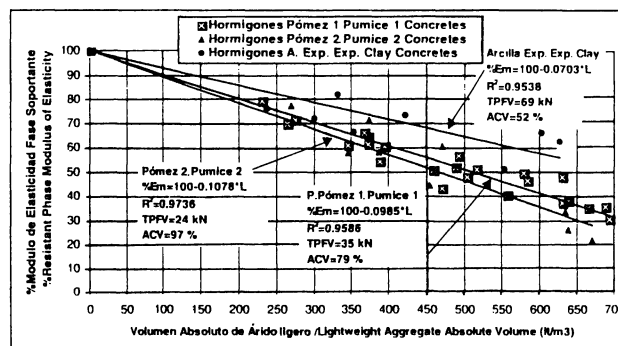


Figura 3.- Relación entre el módulo de elasticidad del hormigón y el volumen absoluto de árido ligero.

Figure 3.- Relationship between concrete modulus of elasticity and lightweight aggregate absolute volume.

elasticidad de la fase soportante que lo constituye). Los resultados de los hormigones se han diferenciado por tipo de fase ligera.

Al igual como sucede en la Figura 1, es posible obtener tres regresiones lineales entre el valor del módulo de elasticidad del hormigón y el contenido de árido ligero, cada una representativa del tipo de árido ligero considerado. Al comparar las regresiones se aprecia que a mayor resistencia de la fase ligera, menor es la pendiente de la 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 ligero.

De esta forma se concluye que para predecir el valor del módulo de elasticidad del hormigón ligero, es recomendable contar con un modelo que considere como variables de entrada las propiedades mecánicas y la proporción de cada fase constituyente. La Ecuación 3, obtenida a partir de un análisis estadístico, considera dichos factores.

$$E_h = [1 - (1,34 - 0,00943 \cdot \text{TPFV}) \cdot L] \cdot E_m \quad (3)$$

Coefficiente de determinación: 0,9027
 Error estándar de la estimación: 1.067,6 MPa
 Límite 95% confianza 95% ± 2.123 MPa
 E_h : Módulo de elasticidad del hormigón a cualquier edad (MPa)
 E_m : Módulo de elasticidad de fase soportante a cualquier edad (MPa)
 L: Volumen absoluto árido ligero (m^3/m^3)
 TPFV: Valor del 10% de finos (kN)

Los 2 parámetros estimados de la Ecuación 3 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. Se puede sostener que el modelo explica en un 90% la variabilidad de E_h . El error estándar de la estimación es de 1.068 MPa y, por consiguiente, el intervalo para un 95% de confianza es ± 2.123 MPa.

La Figura 4 muestra cómo la resistencia intrínseca de la fase liviana, expresada como el valor del 10% de finos (TPFV), influye en la magnitud del módulo de elasticidad del hormigón ligero. En dicha figura se ha supuesto una fase soportante con un módulo de elasticidad de 18.850 MPa y 5 contenidos diferentes de árido ligero: 200, 300, 400, 500 y 600 l/m^3 .

elasticity). The results have been grouped according to the type of lightweight aggregate used.

As it happens in Figure 1, it is possible to obtain three regressions (for each type of aggregate) between the concrete modulus of elasticity and the lightweight aggregate content. Comparing the regressions, it can be observed that if the lightweight phase strength increases the slope of the regression decreases.

It should be noted that when a general regression for all mixes is made, the obtained regression has a coefficient of determination of 0.8646, which is smaller than the obtained values considering a separately regression for each type of lightweight aggregate.

Therefore, it is concluded that a good prediction of the lightweight concrete modulus of elasticity can be obtained, if a model considers the phases mechanical properties and proportions as input data. Equation 3, based on a statistical analysis, considers these factors.

Coefficient of determination: 0.9027
 Standard error of estimation: 1,067.6 MPa
 95% Confidence level: $\pm 2,123$ MPa
 E_h : Concrete modulus of elasticity at any age (MPa)
 E_m : Resistant phase modulus of elasticity at any age (MPa)
 L: Lightweight aggregate absolute volume (m^3/m^3)
 TPFV: 10% fines value (kN)

The 2 estimated parameters of Equation 3 have a P-Value smaller than 0.01, it means that all of them are significant in the regression with 99% of confidence. The ANOVA shows that the model is statistically significant with a confidence level of 99%. It can be concluded that the model explains nearly 90% of the variability of E_h . The standard error of the estimate is 1,068 MPa, then the 95% confidence interval is $\pm 2,123$ MPa.

Figure 4 shows how the intrinsic strength of the lightweight phase (expressed as TPFV), influences the concrete modulus of elasticity. In order to establish a comparison, a resistant phase with a modulus of elasticity of 18,850 MPa was assumed and 5 lightweight aggregate dosage were considered: 200, 300, 400, 500 and 600 l/m^3 .

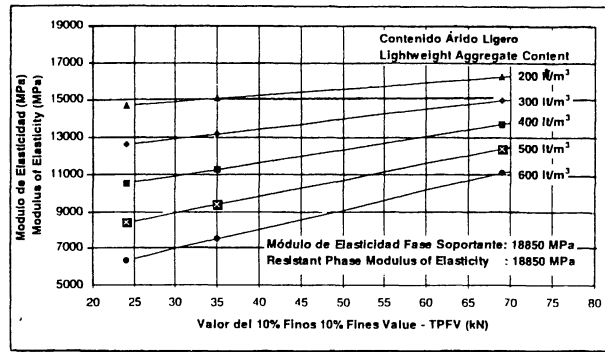


Figura 4.- Relación entre el módulo de elasticidad del hormigón ligero y TPFV del árido para 5 contenidos de árido ligero.

Figure 4.- Relationship between lightweight concrete modulus of elasticity and TPFV for 5 lightweight aggregate content.

La figura indica claramente que la resistencia de la fase ligera, expresada como el valor del 10% de finos (TPFV), es una variable importante en la magnitud del módulo de elasticidad del hormigón ligero. Por ejemplo, para una dosis de árido ligero de 200 l/m³, el módulo de elasticidad del hormigón puede disminuir entre 13 y 22%, respecto del módulo de elasticidad de la fase soportante, para áridos con TPFV de 25 y 70 kN, respectivamente. A mayor dosis de árido ligero el efecto de su resistencia intrínseca sobre el módulo de elasticidad del hormigón es mayor; es así como para los mismos tipos de árido y una dosis de 600 l/m³, la rigidez disminuye entre 41 y 66% de la rigidez de la fase soportante.

Al analizar el efecto que tiene el módulo de elasticidad de la fase soportante en el módulo de elasticidad del hormigón, se concluye que existe una relación directamente proporcional entre ellos, es decir, a mayor resistencia de la fase soportante, mayor es el módulo de elasticidad del hormigón ligero.

La relación es además lineal y depende fundamentalmente de la dosis de la fase ligera. Así, cuando no se utiliza árido liviano, un aumento de 5.000 MPa en el módulo de elasticidad de la fase soportante trae un aumento del módulo de elasticidad del hormigón de exactamente 5.500 MPa. Cuando se considera una dosis de 500 l/m³ de árido liviano, el mismo aumento del módulo de elasticidad en la fase soportante trae consigo un aumento del módulo de elasticidad del hormigón liviano de sólo 2.250 MPa. Se deduce entonces que el efecto de la fase soportante en el módulo de elasticidad disminuye a medida que disminuye su proporción en el hormigón. Se tiene entonces que con la expresión 3 es posible estimar el módulo de elasticidad del hormigón liviano conocidas las proporciones de sus materiales constituyentes y el TPFV del árido grueso ligero y módulo de elasticidad de la fase resistente.

As the figure clearly shows, the lightweight phase strength, expressed as TPFV, is an important variable in the magnitude of the lightweight concrete modulus of elasticity. For example, for a lightweight aggregate content of 200 l/m³, the concrete modulus of elasticity could decrease between 13 and 22% of the resistant phase modulus of elasticity, when the aggregate TPFV changes between 25 and 70 kN, respectively. Also, the lightweight phase content is another important factor; the larger the amount of lightweight aggregate, the larger the effect of its intrinsic strength on the concrete modulus of elasticity. Thus, for an amount of 600 l/m³ and the same types of lightweight aggregate, the concrete modulus of elasticity decreases between 41 and 66% with respect to the resistant phase modulus of elasticity.

When the effect of the resistant phase strength on concrete modulus of elasticity is analysed, it can be concluded that a proportional relationship appears between them, i.e. when the resistant phase strength increases, the lightweight concrete modulus of elasticity also increases.

Furthermore, the relationship is linear and basically depends on the lightweight phase content. Therefore, when lightweight aggregate is not used, an increase of 5,000 MPa on resistant phase modulus of elasticity implies an increase of 5,000 MPa on concrete modulus of elasticity. On the other hand, when the lightweight aggregate content reaches 500 l/m³, the same increase on resistant phase modulus of elasticity implies an increase of only 2,250 MPa, on lightweight concrete modulus of elasticity. Then, it may be concluded that the lower the resistant phase content, the fewer the effect on the modulus of elasticity of lightweight concrete. Finally, with Equation 3 it is possible to estimate the lightweight concrete modulus of elasticity, based on the constituent materials content, the TPFV of the lightweight aggregate and resistant phase modulus of elasticity.

3.3 Comparación del módulo de elasticidad del hormigón ligero obtenido con estimaciones de normas internacionales

Se han desarrollado modelos para estimar el módulo de elasticidad del hormigón, los que consideran en los cálculos propiedades, tales como: resistencia a compresión y densidad del hormigón. Las Ecuaciones 4, 5 y 6 presentan las expresiones propuestas por el Instituto Americano del Cemento (ACI) (17), el Comité Europeo del Hormigón y Federación Internacional del Pretensado (CEB-FIP) (18) y el Instituto Británico de Estandarización (BSI) (19), respectivamente:

$$E_h = 0,04274 \sqrt{D^3} \cdot \sqrt{R_{cil}} \quad (4)$$

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

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

E_h : Módulo de elasticidad del hormigón ligero (MPa)
 R_{cu} : Resistencia a compresión cúbica del hormigón ligero (MPa)
 R_{cil} : Resistencia a compresión cilíndrica del hormigón ligero (MPa)
 D : Densidad del hormigón (kg/m^3)

De un análisis estadístico se puede concluir que la gran mayoría de los valores estimados por dichas ecuaciones están alejados de los valores medidos; todas las expresiones propuestas sobrestiman los valores del módulo de elasticidad del hormigón ligero. 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. La Figura 5 muestra dicha comparación.

3.3 Comparison between obtained lightweight concrete modulus of elasticity and international standard estimates

Different models to estimate the concrete modulus of elasticity have been developed, which consider as input data the compressive strength and density. Equations 4, 5 and 6 are the models proposed by the American Concrete Institute (ACI) (17), the Comité Européen du Béton and Federation International de la Précontrainte (CEB-FIP) (18) and the British Standard Institute (BSI) (19), respectively:

E_h : Lightweight concrete modulus of elasticity (MPa)
 R_{cu} : Lightweight concrete compressive strength of cubes (MPa)
 R_{cil} : Lightweight concrete compressive strength of cylinders (MPa)
 D : Concrete density (kg/m^3)

From a statistical analysis, it could be said that most of the estimated values move away from the actual measured values. All equations overestimate the modulus of elasticity of lightweight concrete. It should be noted that the estimate error of the estimate grows as E_h increases, which means that the higher the concrete density and/or strength the larger the error of the estimate. Figure 5 shows the mentioned comparison.

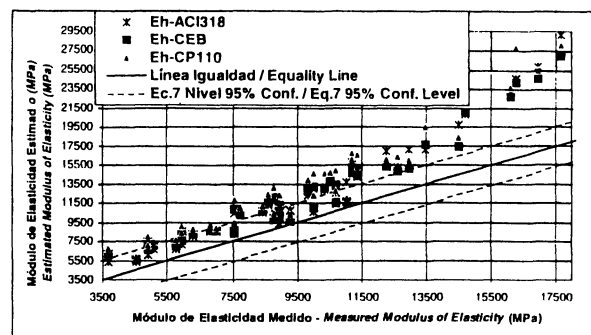


Figura 5.- Comparación entre los valores del módulo de elasticidad medidos y estimados con ecuaciones 4, 5 y 6.

Figure 5.- Comparison between modulus of elasticity measured and the estimated values with equations 4, 5 and 6.

Esta sobrestimación podría deberse a que las tres ecuaciones consideran la variable densidad del hormigón (D) elevada a un exponente mayor que 1,0, mientras que el análisis estadístico muestra una relación lineal entre densidad y módulo de elasticidad (2). Otro factor que podría explicar dicha diferencia, es la humedad del hormigón. Los hormigones ligeros tienen una capacidad de absorción de agua mayor que los hormigones convencionales. Así, el agua absorbida por el hormigón aumenta su densidad pero no aumenta necesariamente su módulo de elasticidad.

Por lo anterior se concluye que las ecuaciones propuestas (4, 5 y 6) no son adecuadas para caracterizar el módulo de elasticidad de hormigones ligeros. De esta forma, se hace necesario derivar una expresión para el valor de E_h , con el fin de reducir el error de estimación. A partir de un análisis estadístico se obtiene la Ecuación 7, que da una mejor estimación del módulo de elasticidad del hormigón liviano, en función de su resistencia a compresión y densidad. La Figura 5 se muestra además el intervalo de un 95% de confianza para la estimación obtenida con la Ecuación 7.

$$E_h = 1,24 \cdot D \cdot \sqrt{R_{cut}} \quad (7)$$

Coefficiente de determinación: 0,9062
 Error estándar de la estimación: 1.042 MPa
 Límite 95% confianza: $\pm 2.072,5$ MPa
 E_h : Módulo de elasticidad del hormigón ligero (MPa)
 R_{cut} : Resistencia a compresión cúbica del hormigón liviano a cualquier edad (MPa)
 D: Densidad del hormigón (kg/m^3)

Los parámetros estadísticos indican que la regresión explica un 90% de la variabilidad de E_h . Tanto el coeficiente de la ecuación (1,239), como la regresión son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 99%. El error estándar de la estimación es 1.042 MPa, teniéndose un intervalo, para un 95% de confianza, de $\pm 2.072,5$ MPa.

Se presentan 4 errores de estimación altos entre 3.984 y 3.103 MPa, todos para una edad de 7 días; después de éstos el error más grande es de sólo 1.735 MPa para el hormigón P2/38/30. El error mínimo de estimación se registra para los hormigones P1/24/66 y L/29/30 y es de 3 MPa.

Sin lugar a dudas la expresión propuesta representa de mejor manera la relación entre E_h y las variables R_{cut} y D, para los datos analizados, en comparación con las expresiones propuestas por el ACI (17), CEB-FIP (18) y BSI (19).

Finalmente, se tiene que con las expresiones 1, 2 y 7 es posible estimar el módulo de elasticidad del

This overestimate could be due to the fact that the three equations use power coefficients larger than 1.0 applied to the concrete density (D), while the statistical analysis shows a linear relationship between density and modulus of elasticity (2). Another factor that could explain the overestimate is the concrete moisture. Lightweight concrete has a higher absorption capacity than conventional concrete. Thus, the water absorbed by the concrete raises the lightweight concrete density but does not necessarily increase the concrete modulus of elasticity.

As a consequence of the above-mentioned, it is concluded that the proposed equations (4, 5 and 6), are not adequate to characterise the modulus of elasticity of lightweight concrete. Then, it is necessary to derive a new expression in order to reduce the error of the estimate. From a statistical analysis, Equation 7 was obtained, which gives a better estimate of the modulus of elasticity of lightweight concrete, based on the compressive strength and density. Figure 5 also shows the 95% confidence interval of the estimate derived from Equation 7.

Coefficient of determination: 0.9062
 Standard error of estimation: 1,042 MPa
 95% Confidence level: $\pm 2,072.5$ MPa
 E_h : Lightweight concrete modulus of elasticity (MPa)
 R_{cut} : Lightweight concrete compressive strength of cubes at any age (MPa)
 D: Concrete density (kg/m^3)

The statistic parameters show that the proposed equation explains 90% of E_h variability. Both, the equation coefficient (1.239) and the regression are statistically significant with a confidence level of 99%. The standard error of the estimate is 1,042 MPa, so the 95% confidence interval is $\pm 2,072.5$ MPa.

Four high errors of the estimate between 3,984 and 3,103 MPa appear. All of them for 7 days tests. After these errors the largest one is only 1,735 MPa for P2/38/30 concrete. On the other hand, the minimum error of the estimate is 3 MPa for P1/24/66 and L/29/30 concretes.

Based on the analysed data, there is no doubt that the proposed expression represents in a better way the relationship between E_h and the variables R_{cut} and D, compared to the ACI (17), CEB - FIP (18) and BSI (19) expressions.

Finally, with Equations 1, 2 and 7 it is possible to estimate the lightweight concrete modulus

hormigón ligero conocidas las proporciones de sus materiales constituyentes y las propiedades físicas y mecánicas del árido grueso ligero.

4. CONCLUSIONES

Como primera conclusión se debe mencionar que la conceptualización del hormigón con áridos ligeros como un material de dos fases (una fase soportante y otra liviana), resulta altamente conveniente para explicar y describir las propiedades mecánicas del HLE.

Además, se presenta como una buena herramienta para incentivar el desarrollo y uso del HLE. La aplicación de este concepto parece ser razonable debido a que la zona de transición no sería un factor limitante de las propiedades mecánicas en este tipo de hormigón en comparación con hormigón normal.

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 ligeros en función de las propiedades mecánicas y dosis de cada fase. Además se ha determinado un índice para caracterizar la capacidad estructural del árido ligero, de fácil medición y que tiene una muy buena correlación con las propiedades mecánicas del hormigón ligero.

A edades muy tempranas la resistencia a compresión de la fase soportante podría ser menos resistente que la fase ligera y, por lo tanto, controlar el mecanismo de falla. De esta manera las ecuaciones 1 y 3 podrían no ser aplicables a hormigones ligeros a edades muy tempranas (< 3 días).

Es importante tener en cuenta el rango de aplicación de las relaciones obtenidas. Si éstas 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 principales rangos en el árido ligero son: resistencia intrínseca dada por: TPFV entre 25 y 70 kN y contenido entre 200 y 700 l/m³. Por otra parte, se consideró una resistencia a compresión entre 24 y 50 MPa para la fase soportante.

De los resultados obtenidos se puede concluir que es factible la elaboración de HLE con cualquiera de los tres áridos considerados y el hormigón con Piedra Pómez es una alternativa técnicamente viable para usos en construcción, particularmente en países donde es un material local disponible. Sin embargo, la Arcilla Expandida presenta ventajas sobre la Piedra Pómez.

of elasticity, based on the content of cement, water and lightweight aggregate, and the physical and mechanical properties of the lightweight aggregate.

4. CONCLUSIONS

As a first conclusion, it should be noted that the two-phase model (resistant phase and lightweight phase), is highly convenient for the explanation and description of the SLC mechanical properties.

It is also considered a good tool to encourage the development and use of SLC. The application of this concept appears to be pertinent because the transition zone would not be a limiting factor for the mechanical properties on these types of concrete as compared with conventional concrete.

It should be concluded that the derived equations allow to predict, with a good level of confidence, the lightweight concrete compressive strength and modulus of elasticity. The equations are based on the mechanical properties and content of the lightweight and resistant phases. Furthermore, an easy measured index representing the structural capacity of the lightweight aggregate has been determined, this index has a good correlation with the mechanical properties of lightweight concrete.

At very early ages, the resistant phase compressive strength could be less resistant than the lightweight phase, and therefore it could control the failure mechanism. Thus, Equations 1 and 3 could not be applied to lightweight concrete at very ages (< 3 days).

It is important, to keep in mind the range of the input variables for the application of the suggested equations. If they are applied out of the ranges considered in the experimental programme, the equations and relationships do not guarantee a good estimate for the concrete mechanical properties. For the lightweight aggregate the main ranges are the aggregate content between 200 and 700 l/m³ and the intrinsic strength given by TPFV between 25 and 70 kN. On the other hand, compressive strength between 24 and 50 MPa was considered for the resistant phase.

The experimental results show that the fabrication of SLC with any of the three considered aggregates is feasible and the Pumice SLC is a technically viable alternative for use in construction, particularly in those countries where it is a locally available material. However, the Expanded Clay presents advantages over the Pumice.

A dosificaciones similares, los hormigones con Arcilla Expandida superan la resistencia a compresión y módulo de elasticidad medida en las mezclas con Piedra Pómez.

En promedio los hormigones con Piedra Pómez presentaron una resistencia a compresión y un módulo de elasticidad un 44% y 24% menores, respectivamente, que los valores obtenidos con Arcilla Expandida.

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

At similar proportions, the mixes with Expanded Clay always showed a higher compressive strength and modulus of elasticity than the Pumice mixes.

On average the Pumice concrete presented a 44% and 24% smaller compressive strength and modulus of elasticity, respectively, than Expanded Clay concrete.

Finally, the research has allowed the proposal of a new equation to estimate the lightweight concrete modulus of elasticity of lightweight concrete based on its compressive strength and density.

REFERENCIAS

- (1) American Concrete Institute. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. Committee 213. ACI 213R-87 (1987).
- (2) López, M. Proposición de una Metodología de Dosificación de Hormigones Estructurales con Aridos Livianos. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Tesis de Magister, (1999).
- (3) Short, A. y Kinniburgh, W. Hormigón Ligero; cálculo, fabricación, diseño y aplicaciones. C. R. Broocks Limited, Londres, 1967.
- (4) Holm, T. Lightweight Concrete and Aggregates. American Society for Testing Materials, Standard Technical Publication STP 169C, 1995.
- (5) Videla, C. & López, M. Mixture Proportioning Methodology for Structural Sand-Lightweight Concrete. ACI Materials Journal Vol. 97 N°3 pp 281-289, mayo-junio 2000.
- (6) British Standard Institute. Methods for sampling and testing of mineral aggregates, sand and fillers. BS 812: Part 3 UK (1975).
- (7) American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. vol 04.02: Concrete and aggregates. ASTM C143-90a. EEUU (1990)
- (8) American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. vol 04.02: Concrete and aggregates. ASTM C138-81. EEUU (1981)
- (9) American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method. vol 04.02: Concrete and aggregates. ASTM C173-78. EEUU (1978)
- (10) American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Specimens. vol 04.02: Concrete and aggregates. ASTM C39-86. EEUU (1986)
- (11) American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. vol 04.02: Concrete and aggregates. ASTM C469-87a. EEUU (1987)
- (12) Instituto Nacional De Normalizacion. (Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas NCh 1037. Of 77 Chile (1977).
- (13) American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Unit Weight of Structural Lightweight Concrete. vol 04.02: Concrete and aggregates. ASTM C567-91. EEUU (1991)
- (14) Neville, A. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc. Nueva York, 1996.
- (15) Videla, C. y López, M. Hormigones Livianos Estructurales con Piedra Pómez - Estudio de Pre-Factibilidad Técnica. Pontificia Universidad Católica de Chile, Informe Técnico HPP 97-04 (1997).
- (16) Pfeifer, D. (1968). Sand Replacement in Structural Lightweight Concrete – Creep and Shrinkage Studies. Journal of the American Concrete Institute (ACI), Title N°65-11 (1968). pp 131-139.
- (17) American Concrete Institute. Standard Building Code. Committee 318. ACI 318-95. EEUU (1995).
- (18) The Comité Européen du Béton and Federation International de la Précontrainte – CEB-FIP. Código CEB-FIP para Hormigón Estructural. CEB (1978).
- (19) British Standard Institute. BSI Concrete Practice 110. CP 110 UK (1975).

* * *